МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ, КАБЕЛЬНОЙ И КОНДЕНСАТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

Чебоксары 2011

УДК 621.315 (076.5)
+621.319.4 (076.5)
ББК З 234я73+З 232.320.8.я73+З 264.6я73

Составители: С.Д. Слонимский
Г.А. Кравченко
В.В. Ильин

Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники: метод. указания к лабораторным работам / сост. С.Д. Слонимский, Г.А. Кравченко, В.В. Ильин; Чуваш. ун-т. – Чебоксары, 2011. – 24 с.

Приведены методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники», а также контрольные вопросы для самопроверки и список рекомендуемой литературы.

Для студентов дневного отделения, обучающихся по направлениям 140600 – Электротехника, электромеханика и электротехнологии, 140200 – Электроэнергетика.

Отв. редактор канд. техн. наук, доцент С.Д. Слонимский

Утверждено Учебно-методическим советом университета

Чувашский
гос. университет
БИБЛИОТЕКА

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ, КАБЕЛЬНОЙ И КОНДЕНСАТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

Отв. за выпуск Н.А. Романова
Компьютерная верстка и правка Т.К. Ивановой

Подписано в печать 27.10.2011. Формат 60×84/16. Бумага газетная.
Печать оперативная. Гарнитура Times. Усл. печ. л. 1,39.
Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 100 экз. Заказ № 654.

Чувашский государственный университет
Типография университета
428015 Чебоксары, Московский просп.,15

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы

Изучение влияния температуры на электрическую емкость конденсатора; выяснение значения и смысла параметра ТКЕ, характеризующего это влияние.

Исходные сведения

Температура оказывает существенное влияние на работу электрических конденсаторов. Причина этого влияния заключается в том, что под действием температуры могут изменяться электрические параметры основного диэлектрика и обкладок, а также их геометрические размеры. Эти изменения, в свою очередь, приводят к изменениям всех параметров конденсатора. Поэтому в технической документации на конденсатор всегда указывается температурный диапазон, в котором конденсатор может эксплуатироваться в течение оговоренного срока при контролируемых изменениях важнейших параметров. В настоящей работе рассматривается влияние температуры на электрическую емкость конденсатора.

Изменение емкости конденсатора при изменении температуры связано прежде всего с изменением диэлектрической проницаемости основного диэлектрика (ε), а также с температурным расширением обкладок и диэлектрика.

В зависимости от типа конденсатора влияние температуры на его емкость может оговариваться по-разному.

Различают обратимые и необратимые изменения емкости. Обратимые изменения емкости характерны для конденсаторов с неорганическим диэлектриком (керамические, слюдяные и т.д.). При обратимом изменении емкости ее значение возвращается к первоначальному, после того как температура окружающей среды, воздействующая на конденсатор, также возвращается к первоначальному значению, например после цик-

ла нагрев – охлаждение. В противном случае имеет место необратимое изменение емкости.

Необратимые изменения емкости характерны для конденсаторов с органическим диэлектриком и нормируются величиной $\Delta C_{ост}$.

Для конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры – конденсаторов с органическими полярными диэлектриками (пропитанная бумага, полярные синтетические пленки) – в технической документации указывается максимально возможный диапазон изменения емкости – $\pm\Delta C$ в процентах по отношению к емкости, измеренной при нормальной температуре (20°С), при изменениях температуры в пределах рабочего диапазона. Такая же характеристика используется для некоторых керамических конденсаторов с ненормируемым значением температурного коэффициента емкости. Причем для этих конденсаторов ΔC указывается в условном обозначении конденсатора на его корпусе буквой Н с последующими цифрами, соответствующими значению $\pm\Delta C$ в процентах.

Для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры введена характеристика ТКЕ (температурный коэффициент емкости).

Температурный коэффициент емкости показывает, насколько изменяется емкость конденсатора при отклонении температуры относительно нормальной на один градус. Нормируемое значение ТКЕ указывается в миллионных долях изменения емкости, отнесенного к одному градусу Кельвина (Цельсия). Математически ТКЕ выражается формулой

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C}\frac{\partial C}{\partial T}\ [1/\text{К}]\,, \qquad (1)$$

где C – емкость конденсатора, измеренная при температуре $\overline{T}$.

Формула (1) характеризует значение ТКЕ в любой точке температурной зависимости емкости. В общем случае ТКЕ может зависеть от температуры, если емкость от температуры изменяется по нелинейному закону. Если емкость от температуры зависит линейно, то ТКЕ является постоянной величиной и может служить в качестве одного из параметров конденсатора. В этом случае в формуле (1) от дифференциала можно перейти к конечным разностям и записать:

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C}\frac{\partial C}{\partial T} \approx \frac{1}{C_1}\frac{C_2 - C_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{C_1}\frac{\Delta C}{\Delta T}\,[1/\text{K}], \qquad (2)$$

где C_1 – емкость конденсатора, измеренная при температуре T_1 в начале температурного диапазона (при 20 °С); C_2 – емкость конденсатора, измеренная при температуре T_2 в конце температурного диапазона. Размерность ТКЕ – [1/К]. Таким образом, если известна емкость конденсатора при одной температуре (T_1) и его ТКЕ, то емкость этого конденсатора при другой температуре (T_2) можно рассчитать, решив равенство (2) относительно C_2. При этом нужно учитывать, что полученное при расчетах нормируемое значение ТКЕ необходимо записывать, используя множитель 10^{-6}. Например, если по расчету получилось значение ТКЕ, равное +0,0001[1/К], то результат следует представить в виде:

$$\text{ТКЕ} = +100 \cdot 10^{-6}\,[1/\text{K}]. \qquad (3)$$

Температурный коэффициент емкости может быть положительным, отрицательным или нулевым. В системе условных обозначений знак ТКЕ обозначают буквами: П – плюс, М – минус, МП – значение, близкое к нулю. Значение ТКЕ указывают без множителя 10^{-6}. Например, значение ТКЕ, представленное выражением (3), в системе условных обозначений запишется как П100. Это значение может быть нанесено на корпус конденсатора после обозначения номинальной емкости и допускаемых технологических отклонений емкости от номинального значения.

При проектировании радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры иногда бывает необходимо учитывать зависимость емкости используемых конденсаторов от температуры и обеспечивать либо заданное, либо нулевое значение ТКЕ. Требуемое значение ТКЕ при заданной емкости можно обеспечить, используя несколько конденсаторов с различными значениями ТКЕ, соединяемых последовательно, параллельно или по смешанной схеме. Для проведения расчетов можно использовать следующие формулы:

при параллельном соединении:

$$\text{ТКЕ}_{\Sigma} = \frac{C_1}{C_{\Sigma}}\text{ТКЕ}_1 + \frac{C_2}{C_{\Sigma}}\text{ТКЕ}_2\,; \qquad (4)$$

при последовательном соединении:

$$\text{ТКЕ}_{\Sigma} = \frac{C_{\Sigma}}{C_1}\text{ТКЕ}_1 + \frac{C_{\Sigma}}{C_2}\text{ТКЕ}_2 . \qquad (5)$$

В этих выражениях ТКЕ_{Σ} – суммарный ТКЕ двух последовательно или параллельно соединенных конденсаторов; C_1, C_2, ТКЕ_1, ТКЕ_2 – значения емкостей и температурных коэффициентов емкости соответственно первого и второго конденсаторов. C_{Σ} – суммарная емкость двух конденсаторов:

при параллельном соединении:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 , \qquad (6)$$

при последовательном соединении:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} . \qquad (7)$$

Все расчеты нужно производить с учетом знака ТКЕ.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из пяти образцов керамических конденсаторов, размещенных в термостате; прибора Е7-8 (цифровой мост), служащего для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсатора; переключателя, с помощью которого любой из образцов может быть подключен к измерительному мосту, и термопарного указателя температуры. Схема представлена на рис. 1.1.

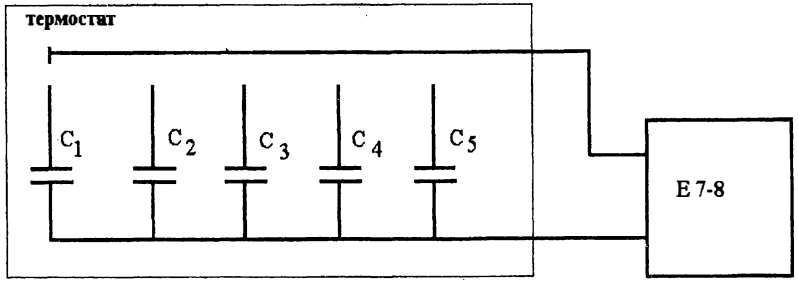

Рис.1.1. Схема ТКЕ

Экспериментальной частью данной работы является получение зависимостей емкости и тангенса угла потерь конденсатора (tgδ) от температуры для пяти образцов и графическое изображение этих зависимостей.

Расчетная часть работы состоит из определения значений ТКЕ каждого из образцов конденсаторов по полученным графикам, а также нахождения $ТКЕ_{\Sigma}$ для схемы, заданной преподавателем.

Работа выполняется следующим образом. Вначале следует провести измерения емкости и tgδ образцов при комнатной температуре. Для этого нужно убедиться, что на термопарном указателе температуры установлено значение комнатной температуры (термопарный указатель определяет разницу между температурой окружающей среды и температурой в измеряемой точке – в нашем случае внутри термостата). Далее с помощью переключателя образцы последовательно подключаются к измерительному мосту. При подключении очередного образца следует правильно установить рабочий диапазон измерения прибора. Для этого используется ручная установка диапазона с помощью переключателя поддиапазонов, расположенного на лицевой панели прибора. Диапазон измерений следует выбрать с таким расчетом, чтобы значение емкости каждого из образцов было получено с максимальным количеством значащих цифр. При подключении образцов считываются значения емкости и tgδ.

После проведения указанных измерений следует включить термостат. Следующие измерения необходимо проводить при определенных значениях температуры, устанавливаемых в процессе нагрева, например при 40 , 60 и 80 °С. Нагревать образцы до более высоких температур не рекомендуется.

Для получения правильных результатов нагрев образцов должен проводиться ступенчато с выдержкой определенного времени при каждой температуре для достижения стационарного температурного режима. Можно рекомендовать следующий порядок действий. Чтобы измерить параметры образцов, например, при 40°С, нужно отключить термостат при достижении температуры несколько меньше намеченной (например, при 37°С). В дальнейшем температура за счет инерционности процесса несколько возрастет, а потом стабилизируется. По дости-

жении стабильной температуры следует провести измерения параметров всех образцов, занести результаты измерений в таблицу и включить термостат для дальнейшего нагрева.

По окончании измерений полученные данные необходимо изобразить в виде графика. Для этого нужно правильно выбрать масштаб значений емкости и температуры по осям (по вертикальной оси откладываются значения емкости (или tgδ), а по горизонтальной – значения температуры). Экспериментальные точки должны располагаться равномерно в пределах площади, ограниченной осями координат. Зависимость емкости от температуры изображается в виде прямой, проведенной между экспериментальными точками (изображение графика в виде ломаной линии не допускается). График зависимости $\mathrm{tg}\delta = f(T)$ может быть изображен в виде плавной кривой, проведенной также между экспериментальными точками. По графикам зависимости $C = f(T)$ для каждого из образцов необходимо найти значение ТКЕ, используя соотношение (2). При этом значения C_1 и C_2 необходимо определить по графику, а не из таблицы.

Задание

1. Снять и построить температурные зависимости емкости и тангенса угла потерь для пяти образцов конденсаторов.
2. Определить значения ТКЕ для всех образцов.
3. Сравнить полученные значения с нормируемыми.
4. Для схемы, указанной преподавателем, рассчитать ТКЕ_Σ, используя соотношения 4 и 5.
5. Изобразить графически расчетную зависимость $C_\Sigma = f(T)$, используя значения ТКЕ_Σ и C_Σ, полученные в п. 4. Нанести на график экспериментальные точки $C_\Sigma = f(T)$, используя результаты экспериментов и схему соединения конденсаторов, путем расчета значения C_Σ при каждой температуре.
6. Для одного из образцов выбрать схему соединения и рассчитать параметры дополнительного конденсатора, позволяющего обеспечить нулевой или заданный преподавателем ТКЕ_Σ при определенном значении суммарной емкости.

Контрольные вопросы

1. Как зависят ёмкость и тангенс угла потерь конденсаторов различного типа от температуры? Как объясняются эти зависимости?

2. Каким образом учитывается влияние температуры на емкость конденсаторов различного типа и как отражается это в технической документации и маркировке конденсаторов?

3. Для каких конденсаторов вводится параметр ТКЕ?

4. Что такое ТКЕ и как указывается его значение в маркировке конденсаторов?

5. Как рассчитать значение $ТКЕ_{\Sigma}$ для сложной схемы соединения нескольких конденсаторов?

Рекомендуемая литература

Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969. 592 с.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОДНОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

Цель работы

Изучение причин потерь энергии электрического поля в различных элементах конструкции кабеля; количественная оценка потерь в зависимости от тока в жиле и расстояния между кабелями.

Исходные сведения

При передаче энергии по кабелю часть её теряется в различных элементах его конструкции. В зависимости от вида приложенного напряжения (постоянного или переменного) потери будут различны. Если в кабелях постоянного тока потери определяются джоулевыми потерями в жиле и оболочке, то на переменном напряжении появляются дополнительные потери за счет индуцированных токов в элементах кабеля в переменном магнитном поле.

В кабелях переменного тока вокруг жил создается переменное магнитное поле, которое приводит к появлению электродинамических сил, увеличению сопротивления жил за счет поверхностного эффекта и эффекта близости, а также к появлению потерь энергии в оболочке и броне.

При передаче трехфазного тока часто используются три однофазных кабеля. Это обусловлено тем, что одножильные кабели, особенно высокого напряжения, можно изготовлять большими строительными длинами, чем трехфазные, что упрощает монтаж кабельных линий, дает возможность уменьшить количество соединительных, стопорных и полустопорных муфт в них.

Возможны три случая прокладки одножильных кабелей, работающих в цепи трехфазного тока:

а) оболочки соединены и заземлены на одном конце кабельной линии;

б) оболочки соединены в начале линии и её конце, но заземлены только с одной стороны;

в) оболочки соединены и заземлены на обоих концах кабельной линии.

Потери, возникающие в оболочках, могут быть от продольных токов по металлическим оболочкам (поэтому они появляются только при соединении оболочек с двух сторон линии) и потерь, вызываемых вихревыми токами в толще металлических оболочек (следовательно, они возникают при всех случаях прокладки, при прохождении тока по жилам). Потери энергии в металлических оболочках приводят к нагреву кабеля, что уменьшает нагрузочную способность кабельной линии. Если оболочки одножильных кабелей замкнуты на обоих концах линии, то в них появляются индуцированные токи, которые приводят к потерям в оболочках, достигающим нескольких десятков процентов потерь в жилах. Если оболочки замкнуты только с одного конца, то на другом конце появляется наведенная ЭДС, которая может достигать нескольких сотен вольт на один километр линии, что может быть опасным при эксплуатации такой кабельной линии. Наведенная ЭДС зависит как от значения тока, протекающего по жиле кабеля, так и от расстояния между кабелями при прокладке.

В лабораторной работе исследуется зависимость тока и наведенной ЭДС в оболочках кабеля от тока в жиле кабеля и расстояния между кабелями.

В данной работе исследуется однофазная линия, так как работа трехфазной линии в принципе не отличается от работы однофазной, в то время как расчет потерь в последней осуществляется по более простым уравнениям.

Расчет ЭДС, токов и потерь в оболочках

Расчет коэффициента индукции между жилой и контуром оболочек производится по формуле

$$M = M_а + M_б;$$

$$M_а = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \ln 2 \frac{S}{D_{об}};$$

$$M_б = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{об} + \Delta_{бр}}{D_{об} - \Delta_{бр}};$$

где μ_0 – магнитная постоянная вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная эффективная магнитная проницаемость брони (для ленточной брони принимается равной 300); S – расстояние между осями кабелей; $\Delta_{бр}$ – толщина брони кабеля; $D_{об}$ – средний диаметр оболочки кабеля.

ЭДС или напряжение между оболочками кабеля E, если оболочки разомкнуты на одном конце линии, вычисляется по формуле

$$E = 2\omega MJ,$$

где J – ток в жиле.

Ток в оболочках кабелей $J_{об}$, если оболочки замкнуты на обоих концах линии, вычисляется по формуле

$$J_{об} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_{об}^2 + \omega^2 M^2}} J.$$

Отношение потерь в оболочке $P_{об}$ к потерям в жиле $P_ж$ в этом случае вычисляется по формуле

$$P_{об} = y_{об} P_ж,$$

где $y_{об} = m^2 \frac{R_{об}}{R_ж}$ и $m^2 = \frac{(\omega M)^2}{R_{об}^2 + (\omega M)^2}$,

где $R_{об}$, $R_ж$ – сопротивления оболочки и жилы переменному току.

В одножильных кабелях недопустимо применять стальную ленточную броню, так как в этом случае дополнительная взаимная индуктивность $M_б$ за счет брони значительно увеличивает общую индуктивность M. Это приводит к резкому увеличению ЭДС или потерь в оболочках.

У многожильных кабелей сумма токов в жилах при симметричной токовой нагрузке равна нулю, поэтому вдоль оболочки не будет действовать магнитодвижущая сила. В таких кабелях можно применять стальную ленточную броню. Магнитное поле трех жил частично взаимно компенсируется. Потери в оболочках трехжильных кабелей ниже, чем в одножильных.

Описание лабораторной установки

На стенде проложена небольшая кабельная линия (кабель с броней). Схема установки для определения тока и наведенной ЭДС в оболочках кабеля представлена на рис. 2.1.

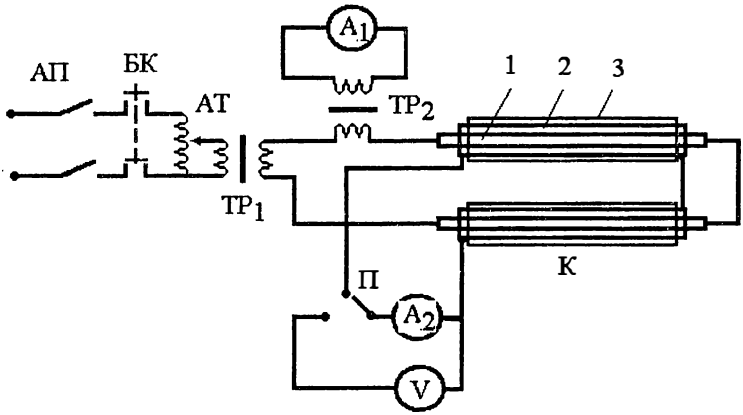

Рис.2.1 Установка для определения тока и наведенной ЭДС в оболочках кабеля:
1,2,3 – соответственно жила, оболочка и броня кабеля; $ТР_1$ – трансформатор тока; АТ – регулятор напряжения; $ТР_2$ – измерительный трансформатор; БК – дверной блок-контакт; П – переключатель рода измерений; АП – автоматический выключатель; К – кабельная линия

Перед включением регулятор напряжения выводится до нуля. Затем включают питание и устанавливают по амперметру A_1 необходимый ток в жиле 1, измеряют ЭДС на конце линии и ток в оболочках 2 (с помощью вольтметра V и амперметра A_2 при различных положениях переключателя рода работ П). Аналогичные измерения проводятся при различных расстояниях

между кабелями. Расстояние фиксируется по шкале, установленной на стенде, а изменяется при включении специального тумблера, установленного на передней панели стенда.

Задание

1. Измерить ток в оболочках кабелей и ЭДС в зависимости от тока в жилах при постоянном значении *S*.

2. Измерить ток в оболочках кабелей и ЭДС при различных расстояниях между жилами при постоянном значении тока в жилах.

3. По геометрическим размерам жилы и оболочки получить значения, найденные в п.1 и 2 расчетным путем.

4. Рассчитать потери в оболочках. Сравнить экспериментальные и расчетные результаты.

Примечание. При расчетах следует учесть сопротивление соединительных проводов.

Контрольные вопросы

1. Основные элементы конструкций различных силовых кабелей.

2. Потери, возникающие в элементах конструкции кабеля при передаче электрической энергии.

3. Электротехнические материалы, применяемые для изготовления кабелей различных конструкций.

4. Электромагнитные поля, возникающие в кабельных линиях при передаче электрической энергии.

5. Методы расчета токов и ЭДС в кабельной линии при различных способах прокладки.

6. Влияние условий прокладки на допустимую нагрузку кабельной линии.

7. Работа экспериментальной установки и учет её особенностей при расчете токов и ЭДС.

8. Составные элементы высоковольтных и низковольтных кабельных линий.

9. Разновидности кабельной арматуры.

Список рекомендуемой литературы

1. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный и др.; под. ред. В.А. Привезенцева. 2-е изд. М.: Энергия, 1975.

2. Белоруссов Н.И., Саанян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / под ред. Н.И. Белоруссова. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1988.

3. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА

Цель работы

Экспериментальное исследование влияния характера распределения электрического поля на электроизоляционные свойства воздуха.

Исходные сведения

В электрических и электронных устройствах газы часто используются в качестве электроизолирующей среды. Воздух образует внешнюю изоляцию электроизоляционных конструкций, эксплуатируемых в атмосферной среде. Изоляционные промежутки между электродами, заполненные твердым, жидким диэлектриком, и различными газами являются внутренней изоляцией. Рассмотрим природу электроизоляционных свойств газов.

При малой напряженности поля газы, и в частности воздух, являются хорошими (почти идеальными) диэлектриками. Это объясняется тем, что газ состоит в основном из нейтральных молекул, которые не участвуют в процессе электропроводности. Тем не менее сопротивление газового промежутка не бесконечно из-за наличия небольшого количества свободных зарядов электронов и ионов, которые возникают в результате ионизации атомов и молекул газа внешними ионизирующими факторами (солнечная и космическая радиация, фоновое рентгеновское излучение Земли и др.). Под действием естественных ионизирующих факторов в воздухе создается концентрация свободных носителей заряда в пределах до 10^{-9}м$^{-3}$, при этом его удельное сопротивление достигает 10^{20} Ом·м.

При повышенной напряженности поля (напряжение, приложенное к газовому промежутку, достигает некоторого начального уровня U_0) наблюдаются кратковременные импульсы тока, амплитуда которых по мере увеличения напряжения быстро возрастает. При достижении напряжения, равного значению $U_{пр}$, возникает пробой газового промежутка с образованием проводящего канала в виде искры или электрической дуги. Про-

цессы, происходящие в газовом промежутке при напряжениях $U > U_0$, называются разрядными процессами и связаны с появлением в газовом промежутке большого количества свободных зарядов.

Электроизоляционные свойства газов существенно зависят от особенностей строения их молекул, давления и температуры, характера распределения электрического поля, материала и состояния поверхности электродов. В различных электронных и электротехнических устройствах расстояние между электродами может находиться в пределах от долей миллиметра до десяти и более метров, а давление – в пределах от 10^{-5} до 10^{6} Па. В зависимости от уровня приложенного напряжения, а также от свойств газа и характера распределения электрического поля могут происходить различные виды разрядных процессов, отличающихся интенсивностью, пространственно-временными и другими параметрами.

Если электрон встречается с частицей газа, то, в зависимости от уровня этой энергии и условий взаимодействия, между ними возможны следующие основные события – физические процессы:

рекомбинация частиц газа присоединением положительных и отрицательных ионов, электронов;

диссоциация молекул газа;

переход молекулы газа в возбужденное состояние с последующим излучением избыточной энергии в виде фотона;

ударная ионизация молекулы при столкновении электрона с молекулой.

захват электрона молекулой газа с образованием отрицательного иона.

Способностью захвата электрона обладают некоторые так называемые электроотрицательные газы (кислород, элегаз и др.). В результате ионизации количество свободных электронов, движущихся под действием электрического поля, нарастает лавинообразно, и возникающее при этом движение заряженных частиц создает импульс тока через газовую среду.

Численное значение коэффициента захвата η равно обратному значению средней длины пути, пройденного электроном под действием электрического поля до его захвата молекулой

газа. Это значение определяется энергией сродства атомов газа с электроном и слабо зависит от E/δ, где $\delta=(P/P_0)/(T/T_0)$.

Экспериментально найдено, что для сухого воздуха $\alpha=\eta\approx5$ (1/см), при $E/\delta = 23{,}6$ кВ/см и $\alpha > \eta$ при $E/\delta > 23{,}6$ кВ/см; для элегаза $\alpha = \eta \approx 790$ (1/см) при $E/\delta = 89$ кВ/см.

Теория ударной ионизации, впервые разработанная английским ученым Таунсендом, лежит в основе теоретических моделей процессов газового разряда. В соответствии с этой теорией электрон, совершая дрейфовое движение под действием электрического поля, приобретает кинетическую энергию $W=Eq\lambda$, где q и λ – заряд и длина свободного пробега электрона, E – напряженность электрического поля. Ударная ионизация возможна, если $W>W_И$, где $W_И$ – энергия ионизации частицы газа. Значения энергии ионизации молекул основных газовых компонентов воздуха находятся в пределах от 12,2 до 15,4эВ; молекул элегаза – 15,8 эВ, а молекул гелия – 24,6эВ.

Одиночная лавина в пространстве занимает область, подобную падающей капле жидкости. Скорость движения электронов в головке лавины имеет порядок 10^5 м/с. Количество электронов, образующихся в лавине длиной $L_л$, определяется выражением

$$e^{\int_0^{L_л}\alpha_Э(x)dx},$$

где x – координата, направленная вдоль силовой линии электрического поля и отсчитываемая от точки начала образования лавины; $\alpha_Э$ – эффективный коэффициент ионизации ($\alpha_Э(x) = \alpha(x)-\eta(x)$, где $\alpha(x)$ и $\eta(x)$ – коэффициенты ионизации и захвата электронов). Значения этих коэффициентов определяются особенностями строения молекул газа, напряженностью электрического поля, температурой (T) и давлением (P) газа.

Образование лавины электронов вследствие ударной ионизации в некоторой области возможно, если в этой области напряженность электрического поля становится больше начального уровня E_0, когда выполняется условие $\alpha_Э(x)>0$. Обозначим через α коэффициент ионизации, равный среднему числу ионизаций, осуществляемых одним электроном при прохождении им пути единичной длины под действием электрического поля. Таунсендом теоретически получено уравнение

$$\frac{\alpha}{P} = Ae^{\frac{-B}{(E/P)}},$$

где A и B – параметры, зависящие от состава газа и температуры. Для воздуха при 0,05В/(см·Па)<(E/P)<1,5В/(см·Па) эта формула достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. В этом случае A=0,071В/(см·Па), B=0,384В/(см·Па).

При низких давлениях (ниже атмосферного) и малых расстояниях (до 2 см) развитие пробоя газа идет за счет *лавинного механизма.* В соответствии с теорией Таунсенда пробой газового промежутка наступает тогда, когда приложенное напряжение становится больше некоторого значения $U_{пр}$, при котором начинает выполняться условие самостоятельности разряда: $\gamma M>1$, где M–число положительных ионов, образовавшихся в лавине, $M=N-1$; γ – коэффициент вторичной ионизации. Численное значение γ равно вероятности того, что любой из образовавшихся в первичной лавине положительных ионов, дойдя до катода, «выбьет» из него электрон, способный инициировать вторичную лавину.

Значение γ зависит от материала электродов и от напряженности электрического поля. Из указанных выше соотношений для N и α следует, что в равномерном поле с учетом $L_л=L$ условие самостоятельности разряда при лавинном пробое принимает вид $\alpha L>C$, где L–длина газового промежутка; $C=\ln(1+1/\gamma)$. Тогда, считая что $\alpha_э\approx\alpha$, можно получить

$$U_{пр}=BPL/\ln(APL/C).$$

График этой функции имеет вид U-образной кривой. Если считать, что A,B = const, то минимальное значение U^* достигается при $(PL)^*=eC/A$, где e – основание натурального логарифма. При значениях (PL), близких к $(PL)^*$, характер изменения этой функции достаточно хорошо согласуется с экспериментальным законом Пашена, в соответствии с которым $U_{пр}$ является функцией произведения PL. Для воздуха $PL \approx$ 76Па·см, $U^*_{пр}\approx$327В.

Простейшая теория пробоя Таунсенда не учитывает влияния объемного заряда положительных ионов, имеющих значительно меньшую, чем электроны, подвижность и поэтому в течение некоторого времени остающихся в межэлектродном про-

...ский
...университет

странстве после быстрого ухода электронов на анод. Электрическое поле этого объемного заряда изменяет исходную картину распределения электрического поля. Влияние этого фактора было исследовано Роговским [3], Ретером [4] и др.

Существенное отличие экспериментальных зависимостей $U_{пр}(PL)$ от формулы Таунсенда и отклонение от закона Пашена при больших значениях PL (для воздуха – при PL>0,025 МПа·см) объясняется переходом лавинного механизма развития пробоя в *стримерный*. Этот процесс возникает, когда в первичной лавине создается большое количество положительных ионов (M>10^8) и напряженность электрического поля в этой области резко возрастает. При этом образование вторичных лавин происходит по следу первичной лавины, т.е. электроны вторичной лавины движутся к положительно заряженной области первичной. В результате столкновений электронов с ионами происходит интенсивное возбуждение их и испускание большого количества фотонов. В объеме газа начинается фотоионизация. Если первичная лавина доходит до анода, то формирование стримера – тонкого плазменного канала – начинается от катода к аноду. Скорость движения фронта стримера (по результатам измерений, полученных в камере Вильсона) составляет порядка 10^6 м/с, что более чем на порядок выше скорости движения головки лавины. При приближении фронта стримера к поверхности катода возникает волна скачкообразного изменения напряженности электрического поля, которая со скоростью порядка 10^7 м/с распространяется вдоль канала стримера, резко увеличивая его проводимость. Процесс завершается образованием искрового канала пробоя.

Время развития стримерного пробоя соизмеримо со временем формирования достаточно мощной первичной лавины. Это время существенно меньше времени развития лавинного пробоя.

Теоретические модели стримерного пробоя были разработаны Лебом, Миком, Ретером [3]. В соответствии с теорией Мика переход лавины в стример происходит тогда, когда напряженность электрического поля, создаваемая зарядом головки лавины, достигнет напряженности внешнего поля. Напряженность поля пространственного заряда определялась как поле сферического заряда с радиусом, равным радиусу головки лавины. Исходя из этого для равномерного электрического поля было получено уравнение вида

$$E_{пр} = A\alpha(P/L)^{0,5} e^{\alpha L},$$

где $U_{пр}=E_{пр}L$.

Отсюда можно найти $U_{пр}$, с учетом функциональной зависимости α от E/P.

При $\delta \approx 1$ экспериментально найденное значение параметра A для воздуха при $T \approx T_0$ равно $4{,}56 \cdot 10^{-8}$ В/(см·Па).

В неравномерном электрическом поле процесс формирования стримера может происходить и при $U<U_{пр}$, если в области повышенной напряженности электрического поля выполняется условие

$$e^{\int_0^{L_л} \alpha_э(x)dx} > 10^8.$$

Удлинение канала стримера в область более слабого поля происходит до тех пор, пока обеспечиваются условия его существования. Достигнув некоторой длины $L_C<L$, стример исчезает. Затем, в разные моменты времени, возникают последующие стримеры. По мере дальнейшего увеличения приложенного напряжения средняя длина стримеров быстро растет. При напряжении пробоя $U_{пр}$ длина стримера становится равной расстоянию между электродами. При этом создается искровой канал разряда, который при достаточной мощности источника напряжения переходит в дуговой разряд.

Существующие математические модели газового разряда недостаточно полно отражают реальные процессы. Они позволяют оценить только характер влияния различных факторов на разрядные напряжения. Количественные значения этих напряжений определяются на основе полуэмпирических или эмпирических математических моделей.

Напряжение пробоя воздуха в равномерном поле гладких электродов при $0{,}1<L<12$ см, когда значения P и T немного отличаются от P_0 и T_0, определяется полуэмпирической формулой [2],кВ:

$$U_{пр} = 24{,}5\delta L + 6{,}4\sqrt{\delta L}.$$

В неоднородном поле газообразная изоляция характеризуется напряжениями появления коронного ($U_К$), стримерного (U_C) разрядов и пробоя ($U_{пр}$), причем $U_К<U_C<U_{пр}$. По мере увеличе-

ния степени неоднородности поля электрическая прочность имеет тенденцию к уменьшению, а значения $U_К$, $U_С$, $U_{пр}$ все больше отличаются друг от друга. При коронной стадии разряда происходит интенсивный процесс образования лавин в области наибольшего значения напряженности электрического поля. В этой области возникает слабое, равномерно распределенное по объему, свечение газа. Стримерная стадия сопровождается появлением ярко светящихся тонких следов стримеров.

Область наибольшего значения напряженности электрического поля находится около электрода с наименьшим радиусом кривизны поверхности. Напряженность поля, при которой возникает коронный разряд в воздухе около электрода с радиусом кривизны поверхности $r > 1$см, определяется эмпирической формулой [3].

$$E_к = 2,45 K_ш \delta [1 + K_ф / (\delta r)^{0,38}],$$

где $K_ф$ и $K_ш$ – соответственно коэффициенты формы и шероховатости поверхности электрода, $K_ф$ =0,76 – для сферы и $K_ф$ =0,62 – для цилиндра, $K_ш$<1.

Вид зависимости $U_{пр}$ от расстояния L между электродами в неоднородном поле определяется характером распределения электрического поля в газовом промежутке. В изоляционных конструкциях наиболее часто встречаются электроды типов: «игла–игла», «игла–плоскость», «цилиндр–цилиндр», «цилиндр–плоскость», «сфера–сфера», «сфера–плоскость». Зависимости $U_{пр}(L)$ в этих случаях имеют вид монотонно возрастающих функций с убывающей крутизной нарастания, т.е. среднее значение электрической прочности $E_{пр} = U_{пр} / L$ по мере увеличения L убывает тем быстрее, чем выше степень неоднородности электрического поля.

Электрическая прочность газового промежутка между электродами «игла–плоскость» зависит от полярности приложенного напряжения. При отрицательной полярности иглы $U_{пр}$ больше, чем при положительной. Это объясняется влиянием объемного заряда положительно заряженных ионов на характер распределения электрического поля.

На процессы газового *разряда вдоль поверхности твердой изоляции* определенное влияние оказывает природа диэлектрика, изменяющего характер распределения электрического поля и

адсорбирующего на поверхности ионы газа и молекулы влаги. По характеру распределения поля изоляционные конструкции можно отнести к двум типам. К первому из них относится конструкция типа опорного изолятора, а ко второму – типа проходного изолятора (рис.3.1).

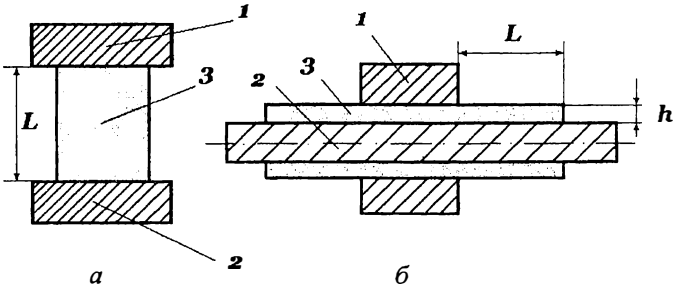

Рис.3.1. Конструкции изолятора: *а* – опорного; *б* – проходного: 1 и 2 – электроды; 3 – диэлектрик

В первом случае (*а*) нормальная к поверхности изолятора составляющая напряженности E_n электрического поля значительно меньше ее касательной составляющей E_t. При этом напряжение перекрытия $U_{пер}$, при котором происходит пробой газа вдоль поверхности диэлектрика, получается несколько меньше, чем напряжение пробоя $U_{пр}$ этого промежутка при отсутствии диэлектрика, т.е. $U_{пер}(L)<U_{пр}(L)$. Причем чем больше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем сильнее это неравенство. Во втором случае (*б*) диэлектрик является барьером между электродами и $E_n>E_t$. Напряжения начала коронных разрядов – $U_К$, скользящих разрядов – $U_{ск}$ и перекрытия $U_{пер}$ определяются геометрическими факторами h и L и диэлектрической проницаемостью твердого диэлектрика:

$$U_К = A_К (h/\varepsilon)^{\alpha_к};$$

$$U_{ск} = A_{ск} (h/\varepsilon)^{\alpha_{ск}};$$

$$U_{пер} = A_{пер} (h/\varepsilon)^{\alpha_{пер}} L^{\beta_{пер}};$$

где A, α, β – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров электродов, вида воздействующих напряжений и диапазона значений h и L. По данным М.И. Мантрова [5], на

переменном токе частотой 50 Гц для действующего значения напряжения, выраженного в киловольтах, при h<4 см, L<40 см эти коэффициенты равны:

$$A_К \approx 10;\quad A_{пер} \approx 67;\quad A_{ск} \approx 90;\quad \alpha_К = \alpha_{ск} \approx 0{,}45;\quad \alpha_{пер} \approx 0{,}4;\quad \beta_{пер} \approx 0{,}2.$$

Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки показана на рис.3.2. Схема состоит из блока коммутации (БК), блока регулирования напряжения (БРН), высоковольтного трансформатора (Т2).

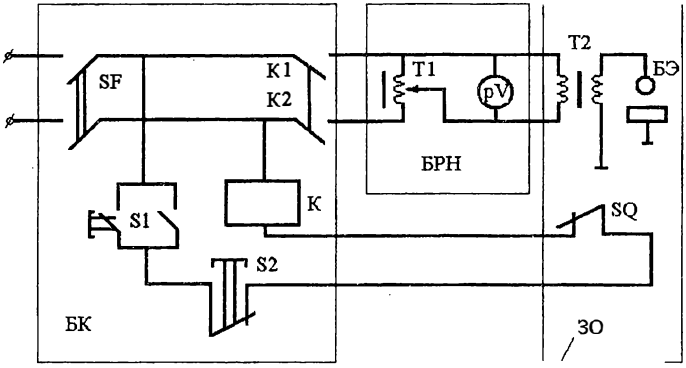

Рис.3.2. Электрическая схема лабораторной установки

Высокое напряжение со вторичной обмотки высоковольтного трансформатора Т2 подается на блок электродов БЭ, расположенных внутри защитного ограждения ЗО. Блок БК обеспечивает подключение БРН к промышленной сети питания (220В, 50 Гц) через контакты К1 и К2 магнитного пускателя К, включение и выключение которого осуществляется кнопками «Пуск» (S1) и «Стоп» (S2). На обмотку магнитного пускателя напряжение подается через блок-контакт SQ, механически связанный с дверцей защитного ограждения. Блок БРН состоит из автотрансформатора Т1, вольтметра PV, автоматического выключателя SF. Напряжение между испытательными электродами определяется по показанию вольтметра PV с учетом коэффициента трансформации трансформатора Т2. Выключатель SF служит для защиты этого

трансформатора от перегрузки по току при пробое газового промежутка между электродами. Блок БЭ состоит из приспособления для закрепления электродов, подвода к ним испытательного напряжения и изменения расстояния между ними.

Методика выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы, ознакомиться с высоковольтной установкой и правилами техники безопасности.

2. Установить требуемые электроды и уточнить у преподавателя диапазон изменения расстояний между электродами.

3. Закрыть дверцу ограждения и убедиться, что ручка автотрансформатора выведена до упора влево.

4. Включить кнопку магнитного пускателя и кнопку «Пуск» автотрансформатора.

5. Удерживая в положении «Вверх» тумблер плавного подъема напряжения, наблюдать за процессами, происходящими в межэлектродном пространстве, и фиксировать соответствующие напряжения по показаниям вольтметра.

Примечание. Напряжение коронного разряда $U_К$ фиксировать по появлению слабого свечения в области повышенной напряженности поля (на острие иглы, в области острых кромок электродов). Напряжение перекрытия $U_{пер}$ и пробоя $U_{пр}$ фиксировать после срабатывания токовой защиты установки. Напряжение скользящих разрядов $U_{ск}$ определять по появлению нитевидных разрядов на поверхности диэлектрика.

Задание

1. Исследовать экспериментально $U_К$ и $U_{пр}$ в воздухе от расстояния между электродами L для заданных преподавателем типов электродов: «плоскость–плоскость», «игла–плоскость», «шар–плоскость» и др.

2. По результатам измерений построить графики функций $U_К(L)$ и $U_{пр}(L)$. Исходя из формулы Мика для стримерной теории пробоя найти значение α.

3. Снять зависимости $U_К$, $U_{ск}$, $U_{пер}$ от параметров h, ε, L при поверхностном разряде.

4. Определить параметры аппроксимирующих функций для $U_К$, $U_{ск}$, $U_{пер}$ для заданных преподавателем типов электродов. Построить графики зависимостей $U_К$, $U_{ск}$, $U_{пер}$ от параметров h, ε, L.

5. Провести анализ полученных результатов, дать им физическое толкование, сравнить с литературными данными.

Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы происходят в газовой изоляции при $U>U_0$? Что характеризуют коэффициенты ионизации и захвата электронов?

2. В чем заключается лавинный и стримерный механизмы газового разряда? Изложить основные положения закона Пашена.

3. Как влияют различные факторы на $U_{пр}$ воздуха в однородном и неоднородном электрических полях?

4. Какие факторы определяют значение $U_К$ в неоднородном электрическом поле?

5. Какие факторы определяют параметры разрядных процессов в газовой среде вдоль поверхности твердой изоляции?

6. Понятия и свойства внешней и внутренней изоляций.

Список рекомендуемой литературы

1. Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. М.: Энергоиздат, 1981. 392 с.

2. Техника высоких напряжений / под общ. ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976. 488 с.

3. Сканави Т.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 907 с.

4. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1958. 390 с.

5. Мантров М.И. Расчет разрядных напряжений высоковольтных изоляторов: консп. лекций. М.: Изд-во МЭИ, 1966. 100 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа 1
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ. 3

Лабораторная работа 2
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОДНОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ. 9

Лабораторная работа 3
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА.....14