

11/3/11

**Одобрено кафедрой
«Энергоснабжение электрических
железных дорог»**

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ**

для студентов IV курса специальности

190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)

для студентов III курса специальности

190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)



Москва – 2007

Составитель – канд. техн. наук, доц. А.Ф.Харченко

Общие указания

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ, студентам необходимо самостоятельно провести: изучение основных закономерностей рассматриваемого в работе явления по разделу «краткие теоретические сведения», а также, если это необходимо, и по рекомендованной литературе; подготовить таблицы и графики для внесения результатов измерений.

Экспериментальная часть каждой лабораторной работы выполняется студентами после собеседования с преподавателем о цели и методах выполнения работы.

Лабораторные работы №1 и 5 выполняются в компьютерном классе с программной средой Electronics Workbench, поэтому студентам необходимо перед проведением лабораторных работ ознакомиться с «Кратким руководством по применению программного комплекса Electronics Workbench V.5.0C» (прил. 1).

Лабораторные работы №2,3,4 выполняются на базе высоковольтной установки типа АИМ-90, поэтому студенты должны ознакомиться с «Кратким описанием высоковольтной установки», используемой при проведении лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений» (прил. 2).

Применение ПЭВМ и «Видеоматериалов проведения лабораторных работ на высоковольтной установке» по дисциплине «Техника высоких напряжений» позволяет выполнять лабораторные работы №2,3,4 без применения высоковольтной установки.

Лабораторная работа № 1

Испытания изоляции высоковольтного электрооборудования повышенным напряжением

Цель работы: ознакомление с методами проведения испытаний изоляции высоковольтного электрооборудования, особенностями испытаний повышенным переменным и постоянным напряжениями.

Краткие теоретические сведения

Серийно выпускаемое высоковольтное оборудование подвергается приемно-сдаточным испытаниям на заводе-изготовителе и на месте эксплуатации после монтажа. В процессе эксплуатации изоляционные конструкции высоковольтного оборудования также подвергаются периодическим профилактическим испытаниям повышенным напряжением.

Экономическая целесообразность испытания как средства повышения надежности состоит в том, что затраты на его проведение и стоимость ремонта или замены отбракованных конструкций оказываются меньше ущерба от аварий, который был бы причинен при пробое неотбракованной дефектной изоляции.

При заводском контроле и исследованиях приложением повышенных напряжений проверяется способность изоляции выдерживать грозовые и внутренние перенапряжения, т.е. кратковременная электрическая прочность. В связи с этим форма и величина испытательных напряжений устанавливаются такими, чтобы они были эквивалентны по воздействию соответствующим перенапряжениям. Такие испытания проводятся на специальных установках (генераторах импульсных напряжений) имитирующих грозовые и коммутационные перенапряжения.

Нормированные значения формы и амплитуды испытательных напряжений для различных видов электрооборудования приведены в ГОСТ 1516.1 и ПУЭ [1;2].

Испытания изоляции повышенным напряжением промышленной частоты позволяет выявить многие дефекты.

Согласно ГОСТ 1516.2 частота переменного напряжения должна быть (50 ± 5) Гц, а форма кривой напряжения на испытываемом объекте должна быть практически синусоидальной (действующее значение высших гармоник не должно превышать 5% основной гармоники), отношение амплитудного значения напряжения к действующему должно быть в пределах $\sqrt{2} \pm 0,07$.

При длительности приложенного испытательного напряжения более 1 мин допустимое отклонение нормированного и измеренного значения равно $\pm 3\%$.

Для определения соответствия изоляции нормированным кратковременным переменным напряжениям применяются следующие методы:

- метод испытания одноминутным напряжением;
- метод испытания напряжением при плавном подъеме.

Применение метода испытаний указывается в [1] и в документации на конкретное электрооборудование.

При испытании внутренней и внешней изоляции в сухом состоянии объект считается выдержавшим испытания, если во время его проведения не наблюдалось полного разряда или недопустимых повреждений для конкретного вида электрооборудования.

Наличие недопустимых повреждений устанавливают на основе рассмотрения следующих признаков:

- потрескивание;
- резкое изменение показаний приборов, например амперметра или вольтметра;
- разряд на защитном шаровом промежутке;
- наличие следов от скользящих разрядов или стримерной короны на поверхности твердой органической изоляции;
- существенная разница между кривыми зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения, измеренных до и после испытания объектов с основной жидкой или твердой изоляцией.

Испытание повышенным напряжением обязательно для всего электрооборудования с напряжением 35 кВ и ниже, а при наличии испытательных устройств – и для электрооборудования выше 35 кВ [2].

Существенным недостатком испытаний переменным напряжением является необходимость применения мощной не-транспортабельной испытательной аппаратуры, если емкость объекта велика.

При испытании объектов с большой емкостью (кабелей, конденсаторов) постоянным напряжением могут быть использованы компактные испытательные установки относительно небольшой мощности, рассчитанные лишь на малые токи утечки. Кроме того, при испытании постоянным напряжением отсутствует опасность появления мощных частичных разрядов, поэтому испытательное напряжение может быть увеличено для лучшего выявления дефектов, во время испытаний можно измерять ток утечки и тем самым получать дополнительную информацию о состоянии изоляции (если ток утечки растет не пропорционально напряжению, то в изоляции возможны дефекты).

Значение испытательного выпрямленного напряжения для кабелей с номинальным напряжением до 10 кВ составляет $5 \div 6 U_{ном}$, а для кабелей 10 ÷ 35 кВ – напряжением $4 \div 5 U_{ном}$. Длительность испытаний составляет 10 ÷ 15 мин.

Основной недостаток испытания постоянным напряжением состоит в том, что оно распределяется по толщ комбинированной изоляции согласно удельному сопротивлению, а не обратно пропорционально диэлектрической проницаемости изоляционных материалов, как это происходит при рабочем напряжении промышленной частоты или при перенапряжениях. Поэтому отношения испытательных напряженностей к рабочим в отдельных диэлектриках комбинированной изоляции получается разным.

Постоянное напряжение применяется для испытания изоляции линий электропередач постоянного тока, а также снятия кривых саморазряда изоляции и для прожигания пробитых

или ослабленных участков кабелей высокого напряжения.

При испытаниях постоянным напряжением коэффициент пульсации не должен превышать 3%. Длительность выдержки испытательного постоянного напряжения указывается в документации на отдельные виды электрооборудования.

В качестве источников высокого напряжения в настоящее время находят применение повышающие испытательные трансформаторы и каскады трансформаторов.

Принципиальная схема испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением промышленной частоты приведена на рис.1.1.

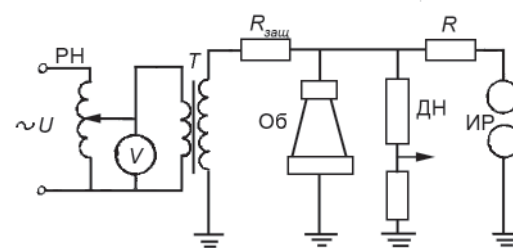


Рис.1.1. Принципиальная схема испытания изоляции высоковольтного оборудования переменным напряжением

Высоковольтная обмотка испытательного трансформатора T присоединяется к испытуемому объекту (Об) через защитный резистор $R_{зщ}$. Основное назначение этого резистора – защита трансформатора от больших токов, ограничение крутизны среза напряжения на выводе трансформатора и демпфирование колебания напряжения в цепи Об- T при разрядах на Об.

Параллельно Об включается измерительный шаровой разрядник ИР, который может служить для измерения напряжения на Об, градуировки делителя напряжения (ДН) и вольтметра V , включенного на стороне низшего напряжения T , а также для защиты Об от опасных превышений испытательного напряжения.

Перед приложением к Об нормированного испытательно-

го напряжения с помощью шаровых разрядников проводится градуировка измерительной системы испытательной установки для Об при напряжении не менее 50% нормированного испытательного.

В целях защиты Об от случайного чрезмерного повышения напряжения расстоянием между шарами ИР устанавливается с пробивным напряжением, равным 110-120% испытательного. ИР подключается через резистор R , который включается для устранения колебаний в цепи Об-ИР при разрядах на шарах и уменьшения износа (эрозии) рабочих поверхностей шаров.

Напряжение на Об плавно изменяется с помощью регуляторного автотрансформатора РН.

Скорость подъема испытательного напряжения, как при переменном, так и при постоянном напряжениях до $1/3$ испытательного значения может быть произвольным. Далее испытательное напряжение должно повышаться плавно, со скоростью, допускающей производить визуальный отсчет по измерительным приборам ($2 \div 3\%$ нормированного напряжения в секунду). После требуемой выдержки напряжение плавно снижается до значения не менее $1/3$ испытательного и отключается [3].

Высоковольтный делитель напряжения ДН состоит из высоковольтного и низковольтного плеча. Зная коэффициент деления ДН и подсоединяя к низковольтному плечу вольтметр, можно определить высокое напряжение на Об, а, подсоединяя осциллографом к низковольтному плечу ДН, можно контролировать форму и определить напряжение на Об.

При необходимости измерения тока при испытаниях в цепь заземления Об или T включаются амперметр или шунт.

Высокое постоянное напряжение получают путем выпрямления переменного напряжения. Выпрямитель в настоящее время собирается из кремниевых элементов с обратным напряжением до нескольких киловольт. При однофазном переменном напряжении схемы выпрямления могут быть однополупериодные и двухполупериодные (мостовые и с нулевым выводом). Для снижения пульсаций на выходе выпрямителя включаются фильтр из дросселя, резистора или конденсатора.

Для измерения постоянных, переменных и импульсных напряжений с длительностью фронта не менее 1 микросекунды используется зависимость пробивного напряжения воздушных промежутков от расстояния между электродами «шар-шар» и делителя напряжения.

Индуктивные и емкостные трансформаторы напряжения, применяются для измерения высокого переменного напряжения, а добавочные высоковольтные резисторы с последовательно включенными микро- или миллиамперметрами и статические киловольтметры для измерения как переменного, так и постоянного напряжения.

Для испытания повышенным напряжением переменного и выпрямленного тока изоляции электрооборудования с номинальным напряжением до 10 кВ включительно, а также отдельных элементов опорной и подвесной изоляции в электроустановках с номинальным напряжением 35-220 кВ используются компактные и транспортабельные установки. Как правило, передвижные испытательные установки позволяют производить испытания повышенным напряжением переменного тока до 100 кВ, выпрямленным напряжением до 140 кВ.

Экспериментальная часть работы

Лабораторная работа проводится на базе вычислительной техники и комплекта программ Electronics Workbench, поэтому необходимо ознакомиться с «Кратким руководством по применению программного комплекса Electronics Workbench V.5.0C» (прил.1).

В экспериментальной части студенты должны самостоятельно собрать схемы испытаний высоковольтного оборудования переменным и постоянным напряжением и провести испытание оборудования с различной конструктивной емкостью. Например, вводов трансформаторов и выключателей с емкостью от долей до единиц нанофард ($C_{\text{в}}$) и кабеля имеющего погонную емкость около 300 нанофард на километр ($C_{\text{к}}$).

Значения конструктивной емкости и сопротивление токам утечки (R_1) имеют несколько вариантов (табл. 1.1). Номер варианта указывается преподавателем.

Таблица 1.1

Показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{в,нФ}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$C_{к,нФ}$	200	300	400	500	600	400	300	200	500	600
$R_{1,МОм}$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1300	1200	1100	1000
	Варианты									
	11	12	13	14	15					
$C_{в,нФ}$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7					
$C_{к,нФ}$	300	400	600	700	200					
$R_{1,МОм}$	1200	1400	1500	1000	1100					

1.1. Собрать схему испытания высоковольтного оборудования переменным напряжением частотой 50 Гц. Принципиальная схема испытаний представлена на рис. 1.1 методических указаний, а ее эквивалентная схема в EWB на рис. 1.2. Испытуемый объект (Об) замещается конденсатором с емкостью $C_{в}$ или $C_{к}$. Напряжение на Об без регулирования для всех вариантов принять неизменным и равным 100 кВ. Защитное сопротивление $R_{заш}$ во всех вариантах составляет 1000 Ом.

Вместо измерительного шарового разрядника ИР устанавливается киловольтметр на полное испытательное напряжение, т.е. на 100 кВ.

В схеме устанавливаются измерительные приборы для регистрации тока и напряжения на Об. К нижнему плечу резистивного ДН подсоединяется осциллограф.

1.2. Установить переменные показатели схемы согласно выбранному варианту ($C_{в}$, R_1).

1.3. Установить коэффициент деления делителей напряжения (ДН) равный 10. В резистивном делителе сопротивление верхнего плеча делителя равно R_1 , а в емкостном делителе емкость верхнего плеча равна во всех вариантах $C_1 = 2$ пФ. Параметры нижних плеч делителей (R_2 и C_2) рассчитываются студентами самостоятельно.

1.4. Включить схему: измерить ток, протекающий через Об, амплитудное и эффективное значение напряжения на Об. Повторить измерения при замене $C_{в}$ на $C_{к}$. Сравнить значения напряжения на Об, зарегистрированные разными приборами. Вычислить мощность трансформатора, необходимую для испытания данного Об.

1.5. На основе схемы представленной на рис.1.2 собрать схему испытания Об постоянным напряжением. Схему выпрямления выбрать самостоятельно.

1.6. Повторить измерения и вычисления согласно п. 1.4. при выбранных $C_{в}$ и $C_{к}$.

1.7. Составить отчет, включающий: схемы с исходными данными испытания и результатами испытаний, таблицу с полученными значениями измеряемых величин и выводы особенностей испытания Об на переменном и постоянном напряжении с малыми и большими емкостями.

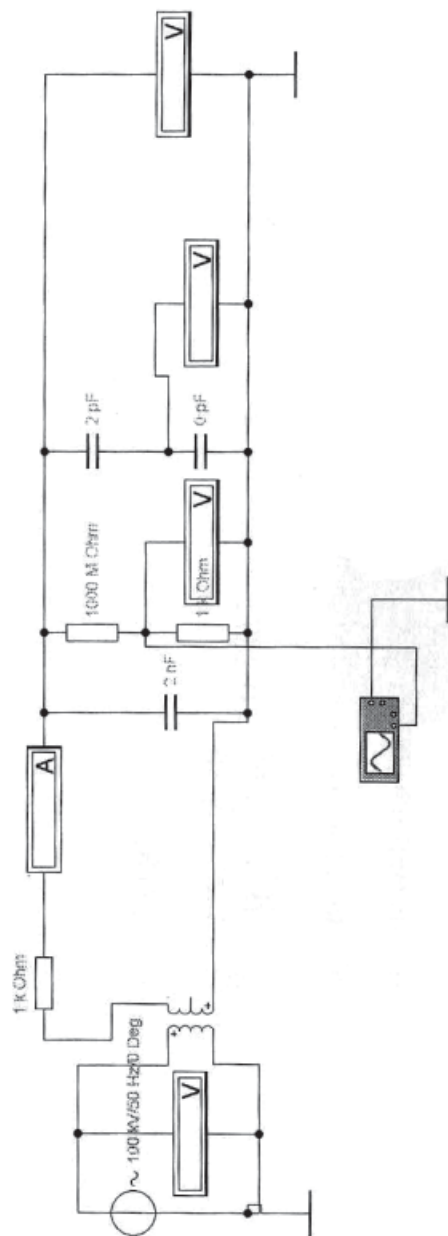


Рис. 1.2. Схема испытания изоляции высоковольтного оборудования переменным напряжением в EWB

Примечание: при подключении вольтметров необходимо увеличивать собственное сопротивление вольтметров, когда оно может оказать влияние на измерения; отключить емкостной делитель при испытаниях постоянным напряжением.

Таблица 1.2

	$I_{и}, A$	$U_{и}, B$	$U_{дел}, B$	$U_{амп}, B$	$P=I_{и} U_{и}, Вт$	Примечание
Св=... нФ						Переменное напряжение
Ск=... нФ						
Св=... нФ						Постоянное напряжение
Ск=... нФ						

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества испытания высоким постоянным напряжением оборудования, работающего под переменным напряжением?
2. Какие недостатки испытания высоким постоянным напряжением оборудования, работающего под переменным напряжением?
3. Из каких элементов состоит высоковольтная испытательная установка переменного и постоянного напряжения?
4. Каковы признаки недопустимых повреждений при испытании переменным напряжением?
5. Каковы методы измерения высокого напряжения?
6. Какова длительность испытаний при переменном и постоянном напряжении?

Рекомендованная литература

1. ГОСТ 1516.1-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. — М.: Госстандарт России, 1997.
2. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок

потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

4. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. /Под общ. ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

5. Гатальский Г. И., Серебряков А. С. Техника высоких напряжений. – М.: РГОТУПС, 1998.

6. Серебряков А. С. Техника высоких напряжений. Высоковольтные испытательные установки. – М.: РГОТУПС, 1999.

7. Кужекин И. П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980.

Лабораторная работа № 2

Электрические разряды в воздухе

Цель работы: изучение основных характеристик электрического разряда в воздухе при переменном напряжении промышленной частоты, давлениях и температуре близких к нормальным ($P_0 \approx 101$ кПа и $T_0 \approx 293$ К).

Краткие теоретические сведения

Атмосферный воздух является естественной изолирующей средой в большинстве электротехнических конструкций. В воздушных линиях электропередач воздух образует единственную изоляцию между неизолированными проводами линий. Воздушные искровые промежутки защитных разрядников (роговых, вентильных) обеспечивают изоляцию между высоковольтными частями защищаемых установок и землей в нормальных условиях работы, а при возникновении перенапряжений уровень электрической прочности воздушных промежутков определяет напряжение срабатывания разрядников.

Основной причиной возникновения электрического разряда в воздухе является ударная ионизация, которая возникает под действием электронов, ускоряемых электрическим полем. Интенсивность этого процесса характеризуется коэффициентом

ударной ионизации α , который определяет число актов ионизации на пути в 1 см вдоль силовых линий электрического поля.

Коэффициент α зависит от напряженности электрического поля E , давления P и температуры воздуха T . При значениях напряженности электрического поля $E/\delta < 100$ кВ/см коэффициент α аппроксимируется выражением

$$\alpha/\delta = 0,2(E/\delta - 24,5)^2, \quad (2.1)$$

где E – в киловольтах на сантиметр, а $\delta = P \cdot T_0/P_0 \cdot T$ – относительная плотность воздуха.

Для возникновения ионизационных процессов под действием сильных электрических полей необходим хотя бы один свободный электрон, который находился бы в разрядном промежутке. Благодаря ультрафиолетовому излучению Солнца, радиоактивному излучению Земли и космическим частицам в воздухе всегда имеются свободные электроны. В результате ионизационных процессов число электронов, и соответственно ионов, увеличивается лавинообразно. Число электронов в лавине на пути X в однородном электрическом поле определяется соотношением

$$N = \exp(\alpha X). \quad (2.2)$$

Образование одной лавины не приводит к пробое разрядного промежутка.

Для того чтобы в дальнейшем разряд не зависел от внешнего ионизатора, необходимо, чтобы начальная лавина за счет вторичных процессов создала хотя бы один вторичный электрон, который положил бы начало новой лавине с числом электронов не менее чем в начальной.

Разряд, не зависящий от внешнего ионизатора, называется **самостоятельным**, а условие самостоятельности разряда, очевидно, имеет вид

$$\gamma \cdot \exp(\alpha X) \geq 1 \quad \text{или} \quad \alpha X \geq \ln(1/\gamma). \quad (2.3)$$

В однородном электрическом поле напряженность постоянна по всей длине промежутка, поэтому при выполнении условия самостоятельности разряда, ионизация охватывает весь промежуток ($\alpha > 0$ по всей длине промежутка), что приводит к его пробое.

Характерным примером однородного поля является элек-

трическое поле, создаваемое между электродами: шар-шар или шаровых сегментов.

Минимальное значение напряжения, при котором выполняется условие самостоятельности разряда, **называется начальным напряжением (U_n)**.

В промежутках с однородным полем начальные напряжения совпадают или равны **пробивному напряжению (U_n)**, при котором происходит полная потеря электрической прочности промежутка.

Для расчетов разрядных напряжений промежутков с однородным полем можно получить удобную формулу, если подставить в условие самостоятельности разряда (2.3) вышеприведенную зависимость α / δ (2.1)

$$0,2\delta X (E/\delta - 24,5)^2 = \ln(1/\gamma). \quad (2.4)$$

Принимая для воздуха $\ln(1/\gamma) = 8,2$ и решая уравнение (2.4), получаем:

$$E_n = 24,5\delta + 6,4\sqrt{\delta/X}, \quad (2.5)$$

и окончательно

$$U_n = 24,5\delta X + 6,4\sqrt{\delta X}, \quad (2.6)$$

где U_n – в киловольтах, а X – в сантиметрах.

Из формулы (2.6) следует, что пробивное напряжение зависит от произведения расстояния между электродами и от носительной плотности воздуха.

Эта зависимость первоначально экспериментальным путем получена Фридрихом Пашеном и носит название закон Пашена.

Закон Пашена гласит: *при неизменной температуре пробивное напряжение газа в промежутке с однородным полем является функцией произведения давления на расстояние между электродами*. Другими словами: если во сколько-то раз увеличить расстояние между электродами и во столько же раз уменьшить давление, то разрядное напряжение не изменится.

Закон Пашена справедлив при $\delta X > 0,75 \cdot 10^{-3}$ см. При больших давлениях газа наблюдаются отклонения от закона Пашена.

В резконеоднородных полях условие самостоятельности разряда выполняется в узкой зоне около электрода, при этом происходит пробой только этой части промежутка (частичный

пробой), а пробой всего промежутка не происходит. Такой разряд называют **коронным разрядом (U_k)**.

Коронный разряд может иметь две основные формы – лавинную и стримерную. Лавинной называется такая форма разряда, при которой в промежутке развиваются только электронные лавины. При этом напряженность электрического поля зарядов каждой из лавин значительно меньше напряженности внешнего поля.

Стримерной называется такая форма разряда, при которой в промежутке кроме электронных лавин развиваются стримерные каналы. Стримерная форма коронного разряда возникает в том случае, если поле зарядов лавины соизмеримо с полем бывшем в промежутке до появления лавины (полем внешнего источника).

Степень неоднородности электрического поля характеризуется отношением максимальной напряженности поля в промежутке к средней, называемым коэффициентом неоднородности поля:

$$K_n = E_{\text{макс}}/E_{\text{ср}}.$$

Промежутки, в которых $K_n > 4$, называются коронирующими или промежутками с резконеоднородным полем. Характерным примером резконеоднородного поля является электрическое поле, создаваемое между электродами: заостренный стержень-диск (плоскость).

Внешняя изоляция большинства высоковольтного оборудования (опорные и проходные изоляторы, высоковольтные вводы и т.д.) состоит из атмосферного воздуха и твердого диэлектрика.

Электрическая прочность таких конструкций определяется разрядами в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика. При этом разрядные напряжения существенно уменьшаются.

Значительное влияние на электрическую прочность изоляции «атмосферный воздух – твердый диэлектрик» оказывает как материал диэлектрика, так и состояние его поверхности, вдоль которой развивается разряд, а также форма электрического поля в разрядном промежутке.

В изоляционных конструкциях «атмосферный воздух – твердый диэлектрик» условие самостоятельности разряда выполня-

ется в узкой зоне воздушного клина, образованного высоковольтным электродом и твердым диэлектриком. При увеличении приложенного напряжения разряд развивается вдоль твердого диэлектрика. Для увеличения разрядного напряжения поверхность твердого диэлектрика делают ребристой.

Типичным примером развития разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика с резконеоднородным электрическим полем является промежуток «стержень (шар) – твердый диэлектрик – заземленная плоскость». Картина распределения электрического поля в воздушном клине такого промежутка представлена на рис.2.1 (размеры указаны в миллиметрах, относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика $\epsilon = 4,5$). Силовые линии электрического поля выходят под углом β , эквипотенциальные кривые показаны в относительных единицах, считая, что на поверхности шара напряженность электрического поля равна 1.

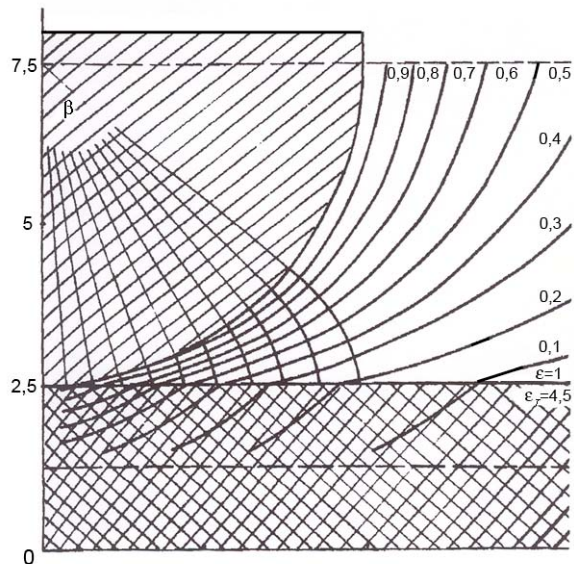


Рис. 2.1. Картина распределения электрического поля в воздушном клине промежутка шар – твердый диэлектрик

В воздушном клине напряженность электрического поля наибольшая и именно здесь по каким-то силовым линиям сначала выполняется условие самостоятельности разряда (U_H) и развивается лавинная форма коронного разряда. При напряжении U_H промышленной частоты в воздушном клине появляется полоска неяркого свечения.

При увеличении напряжения ($U = U_{cr}$) разряд приобретает форму слабо светящихся нитей – **стримеров**, распространяющихся по поверхности диэлектрика. На расположение стримеров оказывает влияние присутствие осевших зарядов от предыдущих стримеров. Каналы стримеров имеют значительную емкость по отношению к заземленной плоскости. Вследствие этого через них проходит сравнительно большой ток.

При дальнейшем повышении напряжения ($U = U_{ск}$) температура каналов стримеров увеличивается и становится возможным термическая ионизация. Термически ионизованные каналы, развивающиеся по поверхности диэлектрика, называются **скользящими разрядами**. Длина скользящих разрядов при переменном напряжении связана с удельной поверхностной емкостью. Дальнейшее повышение напряжения приводит к быстрому увеличению длины скользящих разрядов, и процесс развития разряда завершается перекрытием всего разрядного промежутка.

Экспериментальная часть работы

1. Ознакомиться с экспериментальной лабораторной установкой (прил. 2).
2. Произвести расчет пробивного напряжения по формуле (2.6) для расстояний $X=0,3; 0,5; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0$ см.
3. Шаблон-калибром установить межэлектродные расстояния и произвести измерения пробивного напряжения в промежутке с однородным электрическим полем и резконеоднородным полем (стержень-диск) для расстояний $X= 0,3; 0,5; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0$ см. Результаты расчетов и измерений записать в табл. 2.1 и построить на одном графике зависимости пробивного напряжения от расстояния.

Таблица 2.1

Расстояние X , см	0,3	0,5	1,0	1,2	1,5	2,0
U_n , расчетное, кВ						
U_n , эксперимент, при $K_n=1$, кВ						
U_n , эксперимент, при $K_n>4$, кВ						

4. В конструкции «стержень – твердый диэлектрик – плоскость» определить напряжение возникновения: лавинной короны (U_n), стримерной короны ($U_{ст}$), скользящих разрядов ($U_{ск}$) и перекрытия твердого диэлектрика

5. Составить отчет, включающий: исходные данные и результаты испытаний в виде таблицы и графиков; выводы особенностей зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами и однородности электрического поля в разрядных промежутках.

Контрольные вопросы

1. Какой разряд называется самостоятельным?
2. Что такое начальное и пробивное напряжение?
3. Как можно использовать закон Пашена на практике?
4. Какое электрическое поле называется однородным и неоднородным?
5. Где сначала выполняется условие самостоятельности разряда в изоляционных конструкциях типа опорные изоляторы?
6. Чем отличается стримерная форма коронного разряда от лавинной?

Рекомендованная литература

1. Техника высоких напряжений/Под ред. Д.В.Разевига. – М.: Энергия, 1976.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений/Под общ. ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. – М.: Энергия, 1977.

4. Гатальский Г.И., Серебряков А.С. Техника высоких напряжений. – М.: РГОТУПС, 1998.

Лабораторная работа № 3

Электрическая прочность твердых диэлектриков

Цель работы: изучение особенностей пробоя твердой электрической изоляции.

Краткие теоретические сведения

Твердые диэлектрики очень широко применяются в качестве изолирующих материалов в электротехнических устройствах (электрических машинах, трансформаторах, кабелях, конденсаторах и т.д.). Наибольшее распространение получили органические твердые диэлектрики на основе целлюлозы: электроизоляционная бумага и картон, гетинакс, текстолит; неорганические твердые диэлектрики на основе стекла, слюды и асбеста, а также полимеры (полиэтилен, фторопласт, эпоксидные компаунды и т.д.).

При пробое твердых диэлектриков, в отличие от пробоя газообразных и жидких диэлектриков, происходит необратимый процесс разрушения, т.е. не происходит восстановления электрической прочности после снятия напряжения. Физическая картина пробоя твердого диэлектрика в разных условиях резко отличается, поэтому обычно выделяют три вида пробоя: электрический, электротепловой и ионизационный.

Пробой изоляции при малых временах воздействия (до единиц миллисекунд), соответствующих грозовым и внутренним перенапряжениям, называют электрическим или чисто **электрическим пробоем**. Электрический пробой протекает в результате взаимодействия с частицами диэлектрика ускоренных электрическим полем свободных заряженных частиц (электронов, ионов). Время развития электрического пробоя твердого диэлектрика зависит

от его толщины и обычно составляет доли микросекунды. Теория электрического пробоя твердых диэлектриков, удовлетворяющая потребности практики, отсутствует.

Электрическая прочность однородных твердых диэлектриков, находящихся в однородном электрическом поле, достигает 1000 кВ/см.

Если к твердому диэлектрику прикладываются кратковременные импульсы напряжения сравнительно небольшой амплитуды, то в нем могут возникать микроскопические трещины, не приводящие к потере электрической прочности диэлектрика. При повторных импульсах разряд развивается по пути предыдущего, и микротрещины увеличиваются. Поэтому с ростом количества импульсов пробивное напряжение диэлектрика уменьшается. Это явление, отражающее накопление повреждений изоляции, называется **кумулятивным эффектом**.

Электротепловой пробой развивается следующим образом: в диэлектрике, к которому приложено электрическое напряжение, выделяется тепло, температура диэлектрика возрастает (особенно при затрудненном теплоотводе), а вследствие этого электрические потери еще больше увеличиваются и процесс идет таким образом, усиливаясь до тех пор, пока диэлектрик не разогреется настолько, что будет поврежден (расплавлен, обуглен, пронизан трещинами и т.п. в зависимости от природы данного материала и условий, в которых он находится). При этом пробой в нем произойдет при настолько малом напряжении, при котором он при низкой температуре и неповрежденном материале произойти бы не мог. Для возникновения теплового пробоя достаточно, чтобы разогрелось какое-нибудь одно место диэлектрика, в котором в силу его неоднородности удельные потери повышены, а средняя температура всего объема диэлектрика может оставаться мало отличающейся от начальной.

На постоянном напряжении электрические потери создаются в диэлектрике протекающим через него сквозным (объемным) током утечки. На переменном напряжении к этим потерям, добавляются электрические 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 напряжения и условия, в которых находятся диэлектрики, одинаковы.

Развитию электротеплового пробоя способствуют такие факторы, как малая теплопроводность диэлектрика, большая толщина изоляции, высокая температура, высокая частота приложенного напряжения, а также повреждения изоляции из-за механических или электродинамических воздействий на диэлектрик.

Для снижения вероятности теплового пробоя необходимо устранять дефекты изоляции, а также увеличивать величину отводимой тепловой мощности, за счет увеличения поверхности (площади) диэлектрика, отвода тепла, применения газового или жидкостного охлаждения.

Различия между электрическим и тепловым пробоями сводятся к следующему:

— пробивное напряжение электрического пробоя не зависит от времени действия напряжения и температуры окружающей среды, а теплового — существенно зависит;

— величина пробивного напряжения 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;

Важно иметь в виду, что различие электротеплового и электрического пробоя относится лишь к *возникновению* пробоя. После того как пробой уже произошел, дальнейшие явления (образование электрической дуги или разрушение материала) объясняются уже природой материала и мощностью источника электрической энергии.

При рабочем напряжении происходит постепенное, длящееся годами снижение электрической прочности из-за старения изоляции под действием ионизационных, электрохимических процессов, а также тепловых и механических воздействий.

Согласно существующим представлениям основной причиной старения внутренней изоляции при воздействии сильных

переменных электрических полей являются так называемые *частичные разряды*. Частичные разряды в твердой высоковольтной изоляции возникают в газовых включениях. Газовые включения могут появляться в изоляции в процессе изготовления вследствие усадки заливочных масс и компаундов, из-за неплотного прилегания электродов к поверхности диэлектрика или в процессе эксплуатации вследствие растрескивания или расслоения изоляции. Обычно размеры включений не превышают долей миллиметра. Однако они представляют собой слабое место в изоляции, так как газы имеют меньшую электрическую прочность.

Разрушающее действие частичных разрядов обусловлено бомбардировкой диэлектрика быстрыми электронами из канала разряда во включении. При многократном повторении частичных разрядов поверхность включения постепенно разрушается, на ней появляются локальные углубления, которые со временем образуют в диэлектрике узкие каналы. По мере удлинения каналов электрическая прочность изоляции снижается. Процесс завершается полным пробоем изоляции по пути, подготовленному длительным действием частичных разрядов. Такой пробой называется **ионизационным**.

В изоляционной конструкции может быть несколько расположенных в разных местах газовых включений, имеющих разные размеры и разные напряжения возникновения частичных разрядов. Увеличение толщины диэлектрика сопровождается уменьшением пробивных напряженностей в связи с увеличением вероятности неблагоприятного распределения слабых мест в направлении электрического поля. Время наступления ионизационного пробоя у внешне одинаковых изоляционных конструкций носит случайный характер.

Частичные разряды – не единственная причина электрического старения высоковольтной изоляции. При длительном воздействии постоянного напряжения в изоляции могут протекать также электрохимические процессы старения.

При проведении испытаний твердых диэлектриков из-за его неоднородности значения пробивного напряжения имеют значительный разброс.

С целью получения достоверных значений электрической прочности проводят несколько пробоев n твердого диэлектрика при одной и той же его толщине.

Статистическая обработка результатов испытаний проводится в следующей последовательности:

– вычисляют среднее арифметическое значение \hat{U} пробивного напряжения результатов испытаний по формуле

$$\hat{U} = \left(\sum_{i=1}^n U_i \right) \frac{1}{n}; \quad (3.1)$$

– вычисляют среднеквадратическое отклонение σ (разброс пробивных напряжений относительно среднего значения) по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \hat{U})^2}{n-1}}; \quad (3.2)$$

– определяют границы доверительного интервала U_d , за пределы которого с заданной (доверительной) вероятностью P_d не выйдут значения пробивных напряжений, по критерию Стьюдента

$$U_d = \pm t\sigma / \sqrt{n}, \quad (3.3)$$

где t – коэффициент Стьюдента, учитывающий ограниченность числа испытаний и зависящий от доверительной вероятности P_d .

Значение t определяют по таблице, представленной в [3].

Для доверительной вероятности $P_d = 0,95$ значение $t = 2,57$ при шести измерениях или $2,78$ при пяти измерениях. Для доверительной вероятности $P_d = 0,99$ значение $t = 4,03$ при шести измерениях и $4,6$ при пяти измерениях.

Поскольку электроизоляционные материалы отличаются той или иной степенью неоднородности строения, степень неоднородности определяется по коэффициенту вариации (в %)

$$v = (\sigma / \hat{U}) 100\%. \quad (3.4)$$

Согласно стандарту материалы подразделяют на две группы: более однородные с $v < 15\%$ и менее однородные, для которых $v > 15\%$.

Итоги обработки результатов испытаний записываются в виде:

$$U_n = \hat{U} \pm U_d, \text{ при } P_d = 0,95 \text{ или } 0,99. \quad (3.5)$$

Экспериментальная часть работы

3.1. Ознакомиться с экспериментальной лабораторной установкой (прил. 2).

3.2. Произвести испытания на электрическую прочность твердого диэлектрика различной толщины (по указанию руководителя занятий).

3.2.1. Испытуемый твердый диэлектрик расположить между электродами в виде дисков с закругленными краями или шаровых сегментов так, чтобы твердый диэлектрик плотно прилегал к электродам и выходил за их края.

3.2.2. Для данной толщины твердого диэлектрика произвести шесть испытаний, каждый раз меняя или передвигая испытуемый диэлектрик в разрядном промежутке.

3.2.3. Увеличить число слоев испытуемого твердого диэлектрика (увеличить толщину твердого диэлектрика).

3.2.4. Вновь произвести шесть испытаний, также меняя или передвигая испытуемый твердый диэлектрик с увеличенной толщиной.

3.3. Для каждой серии из шести испытаний рассчитать: среднее арифметическое пробивных напряжений по формуле (3.1), среднеквадратическое отклонение по формуле (3.2), границы доверительного интервала по формуле (3.3), коэффициент вариации по формуле (3.4), а также среднее значение пробивной напряженности $E_{пр} = \hat{U}/X$, где X – толщина твердого диэлектрика.

3.4. Результаты измерений и их обработки по п. (3.3) записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ пробы, i	1	2	3	4	5	6	\hat{U}	σ	U_d	U_n	$E_{пр}$	v
U_p , 1 слой, кВ												
U_p , 2 слой, кВ												

Контрольные вопросы

1. Каковы основные виды пробоев твердого диэлектрика?

2. Каковы характерные отличия электрического пробоя от электротеплового пробоя твердого диэлектрика?

3. За счет чего происходит разогрев диэлектрика при электротепловом пробое?

4. Как и почему зависит пробивное напряжение от толщины диэлектрика?

5. Почему возникают частичные разряды в твердом диэлектрике?

6. Почему необходима статистическая обработка результатов испытаний на пробой диэлектрика?

Рекомендованная литература

1. Техника высоких напряжений/Под ред. Д.В.Разевига. – М.: Энергия, 1976.

2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений/Под общ. ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов. – Л.: Энергия, 1969.

4. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Госиздат физматлит, 1958.

Лабораторная работа №4

Электрическая прочность жидких диэлектриков

Цель работы: изучение влияния различных факторов на электрическую прочность трансформаторного масла и экспериментальное определение его пробивного напряжения.

Краткие теоретические сведения

В качестве жидкой электрической изоляции применяются нефтяные и растительные масла и жидкие синтетические диэлектрики.

Весьма широкое применение нашли масла нефтяного происхождения, так как они сравнительно дешевы, выпускаются в больших количествах и при хорошей очистке имеют высокую электрическую прочность.

Нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное и кабельное) служат для повышения электрической прочности и охлаждения обмоток силовых трансформаторов, изоляцией конденсаторов и кабелей, а также других аппаратов.

Трансформаторное масло является самым распространенным жидким диэлектриком, применяющимся в современных электротехнических устройствах.

Электрическая прочность трансформаторного масла является его важнейшей характеристикой. Наименьшие допустимые значения электрической прочности трансформаторного масла для различного высоковольтного оборудования установлены в Правилах [1;2].

Ниже приведены предельно допустимые значения пробивного напряжения трансформаторного масла для трансформаторов и изоляторов разных классов напряжения [2].

Электрическая прочность, кВ, определенная в стандартном сосуде, для трансформаторов и изоляторов с напряжением:	Перед заливкой	Предельно допустимое
до 15 кВ	30	20
до 35 кВ	35	25
до 150 кВ	60	35
220 кВ	65	55

Электрическая прочность трансформаторного масла (величина пробивного напряжения) зависит от его химического состава и содержащихся в нем примесей. Явление пробоя масла из-за содержания примесей, усложняется тем обстоятельством, что под действием электрического поля происходит перераспределение примесных частиц, которое не только влияет на степень однородности поля, но и приводит к образованию мостиков из твердых частиц или пузырьков газа.

Именно поэтому в настоящее время не существует разработки количественной теории пробоя жидких диэлектриков, которую можно было бы применять на практике.

Многочисленными опытами установлено, что наиболее силь-

но снижается пробивное напряжение при наличии примеси влаги. По данным некоторых авторов при содержании влаги в количестве 0,03% пробивное напряжение трансформаторного масла в десять раз меньше пробивного напряжения тщательно очищенного масла [3].

Даже после тщательной очистки масла в процессе эксплуатации в нем появляется влага. Влага в масле может находиться в трех состояниях: в растворенном виде, в виде эмульсии и в виде отстоя на дне резервуара.

Молекулярно растворимая вода мало влияет на электрическую прочность масла. Но даже малые доли процента эмульсионной воды значительно снижают электрическую прочность масла. Вода – сильно полярная ($\epsilon = 80$), а очищенное трансформаторное масло – нейтральной ($\epsilon = 2,2-2,4$). 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 увеличении температуры масла до 60-80 °С прочность масла возрастает, что объясняется переходом воды из эмульсионного в молекулярно-растворенное состояние. Дальнейшее повышение температуры вызывает испарение влаги, и прочность снижается из-за появления в масле пузырьков водяного пара.

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 снижает электрическую прочность масла находящиеся в нем механические примеси в виде металлических частиц, сажи или обрывков волокон, картона или пряжи твердой изоляции.

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

Поскольку электрическая прочность трансформаторного масла зависит от большого числа факторов, для получения достоверных результатов производят несколько испытаний в одних и тех же условиях.

Для обеспечения одинаковых условий электрическая прочность определяется в сосудах из изоляционного материала с емкостью $300 \div 400 \text{ см}^2$ со стандартными электродами в форме шарового сегмента с радиусом закругления 25 мм и межэлектродном расстоянии равном $2,5 \pm 0,1 \text{ мм}$ (ГОСТ 6581).

ГОСТом предписано проводить шесть испытаний жидкого диэлектрика с пятиминутным интервалом между пробоями. После каждого пробоя жидкого диэлектрика производится перемешивание жидкости между электродами для удаления следов разложения жидкости (копоты) от предыдущего пробоя.

Испытания проводят в стандартных испытательных установках типа АИМ-90, в которых предусмотрены стандартные сосуды (ячейки), стандартные электроды и высокое напряжение автоматически поднимается со скоростью 2 кВ/с.

Обработка результатов испытаний электрической прочности проводится следующим образом:

– вычисляют среднее арифметическое значение \hat{U} пробивного напряжения результатов испытаний по формуле

$$\hat{U} = \left(\sum_{i=1}^n U_i \right) \frac{1}{n}; \quad (4.1)$$

– вычисляют среднеквадратическое отклонение σ (разброс пробивных напряжений относительно среднего значения) по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \hat{U})^2}{n-1}}; \quad (4.2)$$

– определяют границы доверительного интервала U_d , за пределы которого с заданной (доверительной) вероятностью P_d не выходят значения пробивных напряжений, по критерию Стьюдента

$$U_d = \pm t\sigma / \sqrt{n}, \quad (4.3)$$

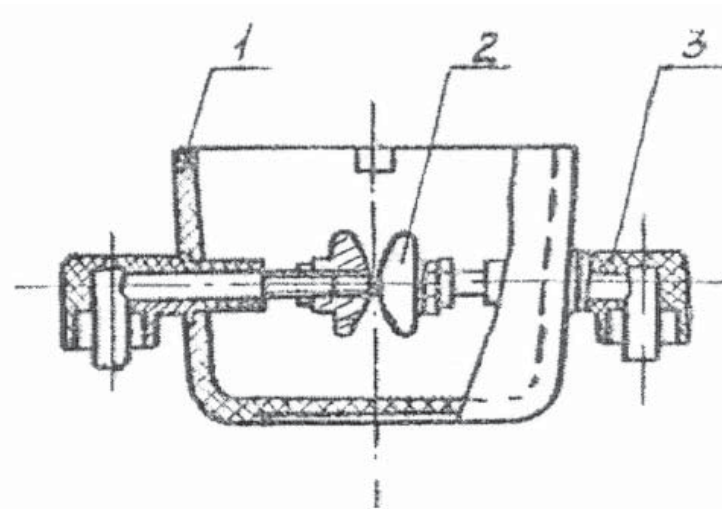


Рис.1. Общий вид стандартного разрядника для определения электрической прочности жидких диэлектриков. 1 – сосуд из изоляционного материала; 2 – стандартный электрод; 3 – изолятор с герметичным выводом

где t – коэффициент Стьюдента, учитывающий ограниченность числа испытаний и зависящий от доверительной вероятности P_d .

Значение t определяют по таблице, представленной в [3].

Для доверительной вероятности $P_d = 0,95$ значение $t = 2,57$ при 6 измерениях или 2,78 при пяти измерениях. Для доверительной вероятности $P_d = 0,99$ значение $t = 4,03$ при шести измерениях и 4,6 при пяти измерениях.

Степень неоднородности трансформаторного масла определяется по коэффициенту вариации (v %)

$$v = (\sigma / \hat{U}) \cdot 100\%. \quad (4.4)$$

Для более однородного масла $v < 15\%$, а для менее однородного $v > 15\%$.

Итоги обработки результатов испытаний записываются в виде:

$$U_n = \hat{U} \pm U_d, \text{ при } P_d = 0,95 \text{ или } 0,99. \quad (4.5)$$

Экспериментальная часть работы

4.1. Работа проводится после ознакомления с испытательной установкой АИМ-90 (прил. 2).

4.2. Шаблон-калибром проверить межэлектродное расстояние в измерительной ячейке, заполнить ее трансформаторным маслом и поместить в установку.

4.3. Через 10 мин после заполнения ячейки трансформаторным маслом подать высокое напряжение на систему электродов измерительной ячейки.

4.4. С пятиминутным интервалом провести шесть пробоев масла. После каждого пробоя трансформаторного масла с помощью стеклянной или пластмассовой палочки производится перемешивание жидкости между электродами.

4.5. Результаты шести пробоев масла занести в табл. 4.1. На основании полученных результатов испытаний определить среднее арифметическое напряжение \hat{U} проведенных пробоев по формуле (4.1), среднеквадратическое отклонение σ по формуле (4.2), пробивное напряжение по формуле (4.5), коэффициент вариации по формуле (4.3). Все результаты занести в табл. 4.1.

4.6. На основании полученных значений электрической прочности масла, сделать вывод о номинальном напряжении трансформатора, в котором может быть использовано испытанное масло.

4.7. По полученной величине коэффициента вариации сделать заключение о степени однородности состава трансформаторного масла.

Таблица 4.1

№ пробоя, i	1	2	3	4	5	6	\hat{U}	σ	U_d	U_n	v
$U_i, \text{кВ}$											

Контрольные вопросы

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

2. Какие факторы влияют на электрическую прочность

трансформаторного масла?

3. Что представляет собой стандартная установка для испытаний жидких диэлектриков?

4. Почему необходимо проводить несколько пробоев масла и зачем установлен пятиминутный перерыв между пробоями масла?

Рекомендованная литература

1. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

3. Казарновский Д. М., Тареев Б. М. Испытание электроизоляционных материалов. – Л.: Энергия, 1969.

4. Сканава Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Госиздат физматлит, 1958.

5. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. /Под общ. ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

Лабораторная работа № 5

Исследование распределения напряжения по гирлянде изоляторов воздушных линий электропередач

Цель работы: определение распределения переменного напряжения на изоляторах в гирлянде при отсутствии и наличии поврежденных изоляторов.

Краткие теоретические сведения

Для подвески проводов на линиях электропередач и для подвески контактной сети электрифицированных железных дорог применяются подвесные изоляторы, собираемые в гирлянды.

На дорогах постоянного тока обычно используют гирлянды из двух фарфоровых или стеклянных изоляторов. На дорогах переменного тока используют гирлянды из трех, а в местах повышенного загрязнения из четырех или пяти таких изоляторов.

На воздушных линиях (ВЛ) электропередач с напряжением 35 кВ устанавливается 3÷4 изолятора в гирлянде, на ВЛ с напряжением 110 кВ устанавливаются гирлянды из 7÷8 изоляторов, а на ВЛ с напряжением 220 кВ – 13÷14 изоляторов.

Неравномерное распределение напряжения по гирлянде определяется конструктивными особенностями подвести изоляторов на опорах и дефектами в самих изоляторах.

Отметим, что максимальное напряжение на изоляторе, расположенного у провода, для ВЛ 35 кВ не должно превышать 8÷10 кВ, а для ВЛ 110 кВ не более 18÷20 кВ [3].

Определение распределения напряжения на изоляторах в гирлянде под напряжением производится с помощью шаровых разрядников, закрепленных на специальной штанге. Напряжение на дефектном изоляторе резко снижается по сравнению с измеренным на предыдущем (неповрежденном) не менее чем в 1,5 раза, что позволяет судить о дефекте в данном изоляторе, подлежащем замене.

Необходимость экспериментального определения распределения напряжения вдоль гирлянды вызвана тем, что электрическая прочность гирлянды зависит от распределения напряжения вдоль поверхности неповрежденных изоляторов, а с увеличением числа изоляторов в гирлянде напряжение по ним распределяется все более неравномерно.

Если не принять специальных мер, на линиях высокого напряжения часть изоляторов может оказаться под таким напряжением, что на этих изоляторах уже при рабочем напряжении возникает корона (частичные разряды), которая является источником радиопомех и причиной коррозии арматуры изоляторов.

Распределение напряжения по изоляторам гирлянды ВЛ переменного тока можно определить с помощью емкостной схемы замещения, если считать, что поверхность изоляторов сухая и чистая.

Обычно гирлянды комплектуются из однотипных изоляторов, поэтому их собственные емкости имеют одинаковые значения ($C = 30 \div 70$ пФ). Для чистой и сухой поверхности $R \gg 1/\omega C$, поэтому распределение напряжения зависит только от емкостей. Каждый изолятор кроме собственной емкости C имеет емкость по отношению к заземленным элементам кон-

струкции опоры C_3 и емкость по отношению к проводу C_n . В реальных условиях емкости $C_3 = 4 \div 5$ пФ и $C_n = 0,5 \div 1,0$ пФ, т.е. не равны нулю, поэтому ток, протекающий через емкости C изоляторов, не остается постоянным, а напряжение распределяется пропорционально току. Наибольшее напряжение приходится на ближайший к проводу изолятор.

Для выравнивания напряжения вдоль гирлянды изоляторов на линиях электропередач с классов напряжения 220 кВ и выше применяется защитная аппаратура в виде металлических колец, восьмерок, овалов, которые укрепляются в месте подвески провода. Наличие арматуры приводит к увеличению емкости C_n изоляторов, ближайших к проводу, и тем самым уменьшает долю напряжения, приходящуюся на эти изоляторы.

Аналогичное влияние оказывает и расщепление проводов в фазе. Арматура, кроме того, защищает изоляторы от разрушения электрической дугой, которая может возникнуть при перенапряжениях. Дуга, возникшая между краями арматуры, не причиняет повреждений поверхности изоляторов гирлянды. Способствует выравниванию распределения напряжения вдоль гирлянды также применение сдвоенных гирлянд, так как при этом емкость изоляторов C увеличивается в большей степени, чем емкость C_3 .

Стекланные изоляторы обладают большей емкостью, поэтому в гирлянде со стекланными изоляторами напряжение делится более равномерно по сравнению с гирляндой из аналогичных фарфоровых изоляторов. Стекланные изоляторы выдерживают большие электромеханические нагрузки по сравнению с фарфоровыми, а возможные при эксплуатации внутренние дефекты стекланных изоляторов легко выявляются визуально, так как при пробое стекланный юбка изолятора рассыпается на мелкие кусочки и при этом изолятор продолжает нести механическую нагрузку.

При дожде и общем увлажнении напряжение почти полностью ложится на нижние поверхности изоляторов, токи утечки резко возрастают (до десятков и сотен мА). Если изоляторы гирлянды загрязнены и увлажнены одинаково и равномерно по всей поверхности, то происходит даже выравнивание распределения напряжения.

Для выяснения характера распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов используется емкостная схема замещения гирлянды.

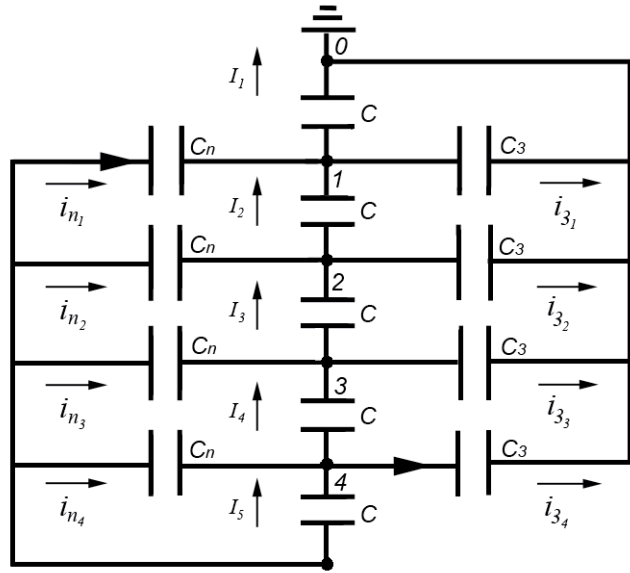


Рис. 5.1. Емкостная схема заземления гирлянды изоляторов

На рис 5.1. изображена емкостная схема замещения гирлянды из пяти изоляторов. Конденсаторы C схемы замещения моделируют собственную емкость изолятора, конденсаторы C_3 – емкость изолятора на заземленные конструкции, конденсаторы C_n – емкость изолятора на провод.

При отсутствии емкостей C_3 и C_n и включении под напряжение только конденсаторов C , график распределения потенциалов по емкостной цепочке представляет собой прямую линию (рис. 5.2), так как токи

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5$$

и падение напряжения на каждой емкости цепочки также одинаковы:

$$\Delta U_1 = I_1/\omega C = \Delta U_2 = I_2/\omega C = \dots \Delta U_5 = I_5/\omega C.$$

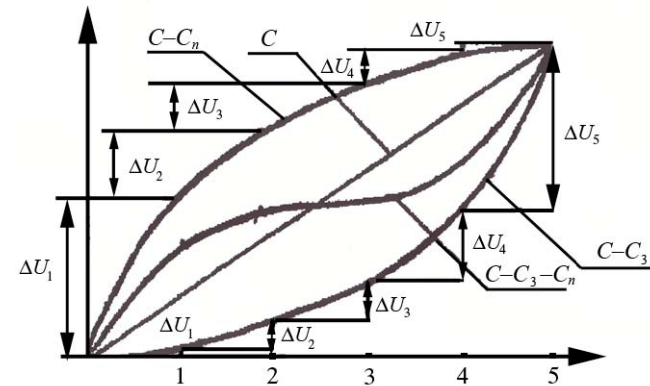


Рис. 5.2. Распределение напряжения по емкостной цепочке схемы заземления гирлянды изоляторов

При подключении к емкостям C емкостей C_3 , соотношение токов в цепи C станет следующим

$$I_1 < I_2 < \dots < I_5.$$

Это объясняется оттеканием токов на землю через подключенные емкости C_3 . Уменьшение тока по емкостям C по мере приближения к заземленной точке приводит к неравномерному распределению падения напряжений по этим емкостям:

$$\Delta U_1 = I_1/\omega C < \Delta U_2 = I_2/\omega C < \dots < \Delta U_5 = I_5/\omega C.$$

Неравномерность распределения напряжения по цепочке конденсаторов в этом случае показана кривой $C-C_3$ на рис. 5.2.

Иная картина имеет место при подключении под напряжение конденсаторов C и C_n . За счет подтекания к цепи C токов через емкость C_n , соотношение токов становится следующим:

$$I_1 > I_2 > \dots > I_5.$$

Поэтому падения напряжения по емкостям C цепочки увеличиваются по мере приближения к заземленной точке:

$$\Delta U_1 = I_1/\omega C > \Delta U_2 = I_2/\omega C > \dots > \Delta U_5 = I_5/\omega C.$$

График распределения напряжения для этого случая показан кривой $C-C_n$ на рис. 5.2.

При включении конденсаторов $C-C_3-C_n$ падение напряжение по емкостям C и график распределения напряжения вдоль

емкостной цепочки будет зависеть от соотношения токов, протекающих через конденсаторы C_3 и C_n .

Для наглядности распределения напряжения, изображенные на рис. 5.2, соответствуют условиям $C=C_3=C_n$.

Распределение напряжения по изоляторам гирлянды при постоянном напряжении в отличие от переменного, определяется в основном сопротивлениями утечки изоляторов, зависящими от влажности окружающего воздуха. Величина удельного поверхностного сопротивления фарфора в сухом и чистом состоянии уменьшается при изменении влажности от 0 до 90% с 10^{12} до 10^8 Ом. Соответственно с увеличением влажности растут токи утечки по поверхности изоляторов, а распределение напряжения все более выравнивается.

Экспериментальная часть работы

Для экспериментального определения распределения напряжения на гирлянде изоляторов используют емкостную модель гирлянды изоляторов, подвешенных на опоре, ЛАТР (лабораторный автотрансформатор) и вольтметр.

Использование математического моделирования на базе вычислительной техники и комплекта программ Electronics Workbench позволяет проведения исследования нескольких вариантов. По указанию преподавателя студентом (группой студентов) может исследоваться один из вариантов или несколько вариантов (табл. 5.1).

5.1. Ознакомиться с методикой использования программ Electronics Workbench для моделирования электрических схем (прил. 1).

5.2. В представленной ниже уже собранной схеме замещения гирлянды изоляторов установить согласно выбранному варианту количество изоляторов в гирлянде и значения емкостей при условии, что все изоляторы в гирлянде исправны.

5.3. Запустить схему (включить питание) и по показаниям вольтметров провести измерения напряжения на емкостях, имитирующих емкости изоляторов гирлянды при отключенных емкостях, имитирующих емкости изоляторов на землю и провод.

Таблица 5.1

Показатели	Вариант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Количество изоляторов	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7
Емкость изолятора C , пФ	30	30	30	30	30	70	70	70	70	70	50	50	50	50	50
Емкость изолятора на землю C_3 , пФ	5	5	5	10	10	5	5	5	10	10	3	3	3	6	6
Емкость изолятора на провод C_n , пФ	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7
Номер поврежденного изолятора, i	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	2	3	4	3	2

Примечание: i – номер изолятора от заземленной конструкции (траверсы).

Таблица 5.2

№ изолятора, i	1	2	3	4	5	6	7
U_i при подключении C , В							
U_i при подключении $C-C_3$, В							
U_i при подключении $C-C_n$, В							
U_i при подключении $C-C_3-C_n$, В							
U_i при подключении $C-C_3-C_n$, В							
При повреждении i -го изолятора							

5.4. Повторить п. 5.3 при подключении емкостей, имитирующих емкость изоляторов на землю.

5.5. Повторить п.5.3 при подключении емкостей, имитирующих емкость изоляторов на провод.

5.6. Повторить п.5.3 при подключении емкостей, имитирующих емкость изоляторов на землю и провод.

5.7. Полученные п.п. 5.3-5.6 данные свести в табл. 5.2 и построить в одних осях координат кривые зависимости распределения напряжения вдоль цепочки изоляторов.

5.8. Для собранной схемы замещения гирлянды изоляторов выполнить условие повреждения одного изолятора (закоротить поврежденный C_1) и провести измерения и построения согласно п.п.5.6 и 5.7

5.6. Произвести сравнение полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные достоинства и недостатки стеклянных и фарфоровых изоляторов?
2. В чем причина неравномерности распределения напряжения по изоляторам в гирлянде?
3. Каким образом можно снизить неравномерность распределения напряжения по изоляторам в гирлянде?
4. В чем отличие распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов на ВЛ переменного и постоянного тока?

Рекомендуемая литература

1. Техника высоких напряжений/Под ред. Д.В.Разеви́га. – М.: Энергия, 1976.
2. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пингаль Ю. С. Техника высоких напряжений/Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
4. Гатальский Г. И., Серебряков А. С. Техника высоких напряжений. – М.: РГОТУПС, 1998.

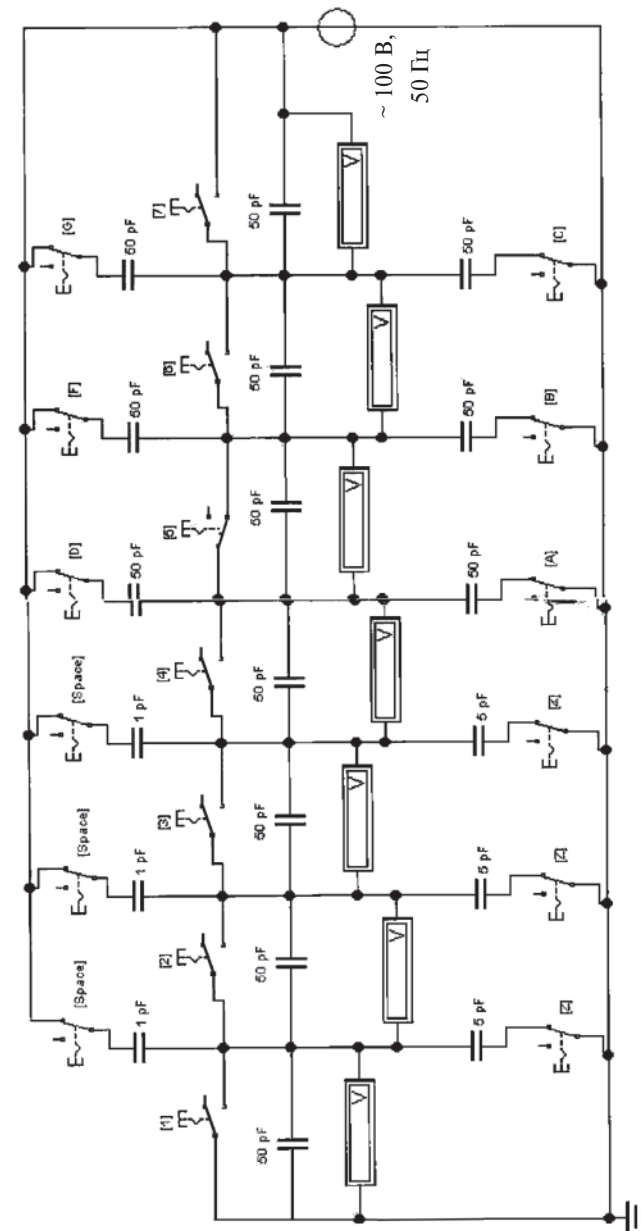


Рис. 5.3. Схема замещения гирлянды изоляторов

Приложение 1

Краткое руководство

по применению программного комплекса Electronics Workbench V.5.0C при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений»

В настоящее время вместо физического моделирования лабораторных работ используют математическое моделирование на базе средств вычислительной техники. К числу наиболее популярных и удобных для моделирования электрических и электронных схем относится комплекс программ Electronics Workbench V.5.0C.

Для работы с программным комплексом Electronics Workbench V.5.0C необходим IBM – совместимый персональный компьютер с процессором 1486 (рекомендуется Pentium) и операционной системой Windows 95 или выше. Интерфейс Electronics Workbench можно освоить за несколько часов работы или двадцать минут в зависимости от подготовки пользователя.

В данном Руководстве приведены только те операции, которые необходимы для проведения лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».

Для начала работы с программным пакетом необходимо загрузить систему, установить Electronics Workbench (EWB), если это не было сделано ранее.

Моделирование лабораторной работы начинается с подготовки нового файла для работы. При отсутствии схемы проведения лабораторной работы, прежде чем создавать чертеж принципиальной схемы средствами программы EWB, на листе бумаги необходимо подготовить ее эскиз с примерным расположением компонентов.

В общем случае процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле EWB компонентов схемы из соответствующей панели компонентов.

Каждая из панелей компонентов программы EWB поочередно могут быть вызваны с помощью соответствующей пиктограммы (иконки), расположенных под строкой меню (рис.П.1.1).

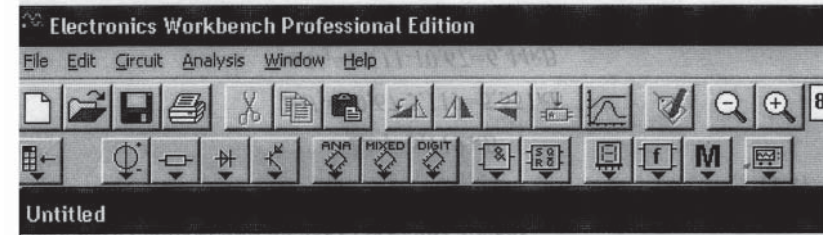


Рис.П.1.1. Панель компонентов программы EWB

Для открытия нужной панели (библиотеки компонентов) необходимо подвести курсор мыши к соответствующей иконке и один раз нажать на левую кнопку мыши. После чего на рабочем поле будет размещена вся библиотека данной панели. Необходимый для создания схемы значок (символ) компонента с помощью мышки с нажатой левой кнопкой переносится из библиотеки компонентов на рабочее поле программы, после чего кнопка отпускается (для фиксации символа).

Для выбора модели компонента необходимо два раза нажать на левую кнопку мыши на символе его графического изображения и в раскрывающемся после этого диалоговом окне указать свой выбор модели. Для редактирования значений параметров модели нужно нажать кнопку Edit. При этом откроется диалоговое окно свойств модели, в котором при помощи мыши и клавиатуры можно изменить значения ее параметров. Выбор изменения подтверждается нажатием кнопки ОК или клавиши *Enter*.

После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу компонента можно подключить только один проводник.

Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после появления круглой площадки темного цвета нажимается левая кнопка и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такой же круглой площадки, после чего

кнопка мыши отпускается, и соединение готово. Примерная схема приведена на рис. П. 1.2.

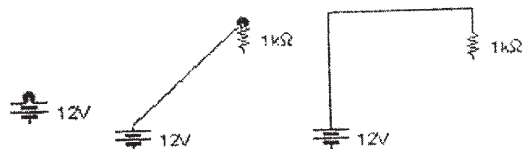


Рис.П.1.2. Схема выполнения соединений проводником

Следует отметить, что прокладка соединительных проводников производится автоматически, причем препятствия - компоненты и другие проводники - огибаются по ортогональным направлениям (по горизонтали или вертикали).

При необходимости подключения к этим выводам других проводников в панели Basic выбирается точка (символ соединения) и переносится на ранее установленный проводник.



Рис.П.1.3 .Символ соединения

Чтобы точка почернела (первоначально она имеет красный цвет), необходимо щелкнуть мышью по свободному месту рабочего поля. Если эта точка действительно имеет электрическое соединение с проводником, то она полностью окрашивается черным цветом. Если на ней виден след от пересекающего проводника, то электрического **соединения нет и точку необходимо установить заново.**

После удачной установки к точке соединения можно подключить еще два проводника. Если соединение нужно разорвать, курсор подводится к одному из выводов компонентов или точке соединения и при появлении площадки нажимается левая кнопка, проводник отводится на свободное место рабочего поля, после чего кнопка отпускается. Если необходимо подключить вывод к имеющемуся на схеме проводнику, то про-

водник от вывода компонента курсором подводится к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопка мыши отпускается.

Точка соединения может быть использована не только для подключения проводников, но и для введения надписей (например, указания величины тока в проводнике, его функционального назначения и т.п.). Для этого необходимо дважды щелкнуть по точке и в раскрывшемся окне ввести необходимую запись (не более 14 символов), причем запись можно смещать вправо путем введения слева нужного количества пробелов. Это свойство может быть использовано и в том случае, когда позиционное обозначение компонента (например, C1, R10) накладывается на рядом проходящий проводник или другие элементы схемы.

Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка и после появления в вертикальной или горизонтальной плоскости двойного курсора производятся нужные перемещения.

Любой компонент схемы можно удалить с рабочего поля при нажатии на нем правой кнопки и выполнения команды Cut или Delete.

При сборке схемы нажатием на элементы правой кнопки мыши можно получить быстрый доступ к простейшим операциям над положением элементов, таких как вращение (rotate), разворот (flip), копирование/вырезание (copy/cut), вставка (paste). Эти же действия можно осуществлять с помощью левой кнопки мыши и соответствующих иконок над панелью компонентов.

Запуск схемы (включение питания) производится переводом находящегося в верхнем правом углу экрана выключателя (0/1) в положение 1 или с помощью команды Ctrl+G. Для остановки моделирования нужно перевести выключатель (0/1) в положение 0 или набрать на клавиатуре команду Ctrl+T. Прерывание моделирование производится после нажатия на кнопку Pause, которая расположена рядом с выключателем (0/1) или выполнить команду F9. Возобновить моделирование можно повторным нажатием клавиши F9 или повторным нажатием выключателя в правом верхнем углу окна программы.

По окончании моделирования или отдельного его этапа приборы зафиксируют значения измеренных параметров, а осциллограф параметры и форму моделируемых процессов.

В случае серьезной ошибки в схеме (замыкание элементов питания накоротко, отсутствие нулевого потенциала в схеме, неправильного соединения) будет выдано предупреждение.

Предупреждения, все объяснения и обозначения в программе Electronics Workbench V.5.0С даны на английском языке. Это одно из неудобств пользования данной программой. Кроме того, необходимо иметь в виду, что ошибки в измерениях могут достигать 5%.

Если схема не помещается на экране монитора, любой ее участок можно просмотреть при помощи линеек прокрутки, расположенных справа и под рабочим полем или изменив масштаб моделирующей схемы.

Перейдем теперь к краткому обзору библиотечных компонентов программы EWB необходимых для проведения лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений». При выполнении этих лабораторных работ используются только пять панелей компонентов (Sources, Basic, Diodes, Indicators, Instruments), в которых находятся все нужные элементы моделируемых схем.

Подключение к схеме пассивных компонентов и контрольно-измерительных приборов производится аналогично.

Источники электропитания постоянного и переменного тока находятся в панели Sources. Для генератора переменного напряжения (рис.П.1.4) задается напряжение (Voltage), частота (Frequency) и начальная фаза (Phase) синусоидального сигнала с помощью диалогового окна (рис.П.1.5).



Рис.П.1.4. Генератор переменного напряжения

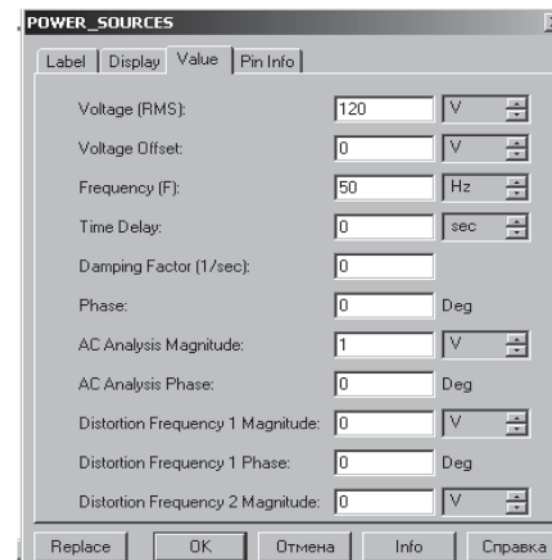


Рис.П. 1.5. Диалоговое окно свойств генератора

Аналогично выбирается источник постоянного тока и его параметры.

В этой панели находится компонент «заземление» (рис. П.1.6), имеющий нулевое напряжение и таким образом обеспечивающий исходную точку для отсчета потенциалов.



Рис.П.1.6. Обозначение компонента «заземление»

В панели Basic кроме точки соединения находятся все пассивные элементы. Обозначения пассивных элементов приведены на рис.П.1.7.

Выбор и установление параметров сопротивлений, емкостей и индуктивностей аналогичен сказанному выше.

Отдельно остановимся на коммутирующем устройстве. Коммутирующее устройство, приведенное на рис.П.1.7, – переключе-

чатель типа однополюсного тумблера, управляемого нажатием назначенной клавиши клавиатуры (по умолчанию клавиши Space – пробел). Имя клавиши устанавливается в диалоговом окне на (рис.П.1. 8).

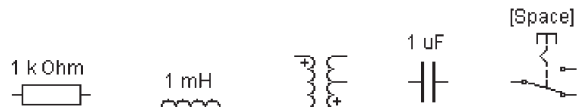


Рис.П. 1.7. Обозначения пассивных компонентов



Рис.П. 1.8. Диалоговое окно свойств переключателя

В панели Diodes находятся выпрямительные элементы – диоды и тиристоры выбор и установление их параметров аналогичен сказанному выше.

В панели Indicators находятся индикаторные приборы (вольтметры, амперметры). Их вид представлен на рис.П.1.9.



Рис.П. 1.9. Обозначения индикаторных приборов

Вольтметры и амперметры обеспечивают отсчет измеряемой величины с точностью до третьего знака.

Параметры приборов задаются в диалоговом окне, показанном для вольтметра на (рис.П.1.10). В поле первого параметра задается входное сопротивление вольтметра, в поле второго – режим измерения постоянного (DC) или эффективного значения переменного (AC) тока.

Напомним, что при физическом моделировании среднее значение выпрямленного напряжения измеряется вольтметрами магнитоэлектрической системы. Эффективные значения фазного или линейного напряжения переменного тока измеряются вольтметрами электромагнитной или электродинамической системы.

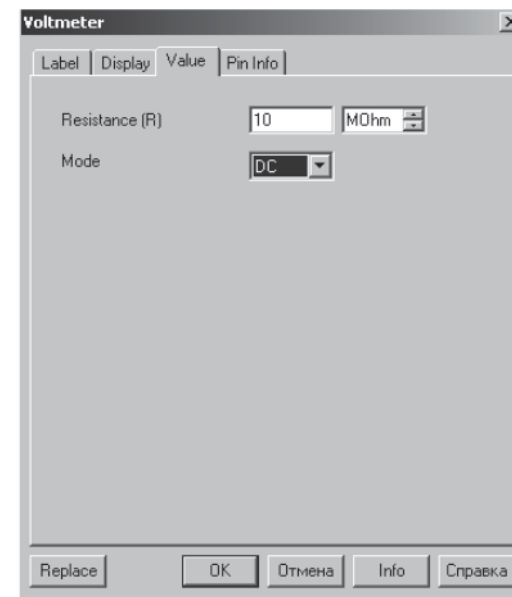


Рис.П. 1.10 . Диалоговое окно свойств вольтметра

Диалоговое окно для амперметра такое же, как и на рис.П.1.10, с той лишь разницей, что первый параметр – это внутреннее сопротивление амперметра, которое значительно меньше входного сопротивления вольтметра. **Отрицательная клемма для подключения этих приборов обозначена широкой черной полосой** и может быть размещена на любой грани иконки при вращении изображения компонента (вращение выполняется нажатием комбинации клавиш Ctrl+R).

Программа EWB позволяет использовать в схеме несколько амперметров или вольтметров.

В панели Instruments находятся мультиметр, осциллограф и функциональный генератор. Для их активации необходимо на обозначении прибора дважды щелкнуть мышью. При этом на рабочее поле выводится уменьшенное изображение мультиметра, осциллографа или функционального генератора.

Подключение мультиметра аналогично подсоединению вольтметра или амперметра. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению мультиметра открывается увеличенное изображение мультиметра, на котором можно изменять характеристики измеряемых величин и регистрировать значения измеряемых величин.

Работа с осциллографом во многом аналогична работе с физическим двухлучевым осциллографом с запоминанием.

На уменьшенном изображении осциллографа выведено четыре зажима для подсоединения к схеме. Левый и правый нижний зажимы представляют собой соответственно вход канала А и вход канала В. Верхний правый зажим – общий, обычно он соединяется с заземлением, чтобы осциллограф измерял напряжение относительно нуля.

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению осциллографа открывается изображение передней панели *простой* модели осциллографа с четырьмя узлами управления и экраном (рис.П.1.11).

С помощью узла TIME BASE панели управления кнопками «вверх-вниз» устанавливается масштаб времени (например, 5ms/div) общий для обоих каналов. В этом же узле располо-

жены три кнопки (Y/T, A/B, B/A), позволяющие задавать вид зависимости отображаемых сигналов. При нажатии на кнопку Y/T по вертикальной оси откладывается напряжение, по горизонтальной оси – время, т.е. регистрируется изменение напряжения во времени. При нажатии кнопки B/A – регистрируется вольтамперная характеристика.

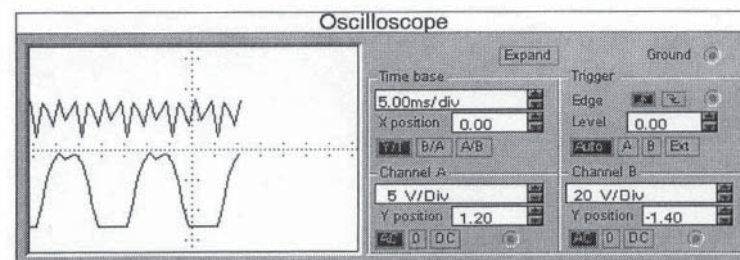


Рис.П. 1.11. Общий вид простой модели осциллографа EWB

Узлы каналов А и В идентичны и независимы друг от друга. Соответствующими кнопками «вверх-вниз» устанавливается масштаб напряжения по вертикальной оси. Цена деления может дискретно устанавливаться от 10 mv/div до 5 Kv/div. Ниже в этих же узлах расположены кнопки «вверх-вниз» позволяющие дискретно сдвигать ось X вверх или вниз. Три нижние кнопки реализуют различные режимы входа осциллографа. Режим работы осциллографа с закрытым входом устанавливается нажатием на кнопку AC (при этом кнопка приобретает темный цвет). В режиме AC на вход осциллографа не пропускается постоянная составляющая сигнала. При нажатии на кнопку DC осциллограф переходит в режим с открытым входом. При нажатии на кнопку 0 вход осциллографа соединяется с общим выводом осциллографа, что позволяет определить положение нулевой отметки по оси Y.

Систему синхронизации (поле TRIGGER) при проведении работ используем в режиме AUTO.

Нажатием клавиши EXPLAND на панели модели осцил-

Краткое описание

высоковольтной установки, используемой при проведении лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений»

Особенностью лабораторных работ №2,3,4 является то, что они выполняются на установках высокого напряжения переменного тока. Это обстоятельство, а также то, что студенты, как правило, не обучены правилам работы на установках высокого напряжения, обуславливает дополнительные требования к организации проведения занятий.

Все студенты перед началом лабораторных занятий проходят инструктаж по технике безопасности с записью и росписью о получении инструктажа в журнале. Непосредственно проводит все работы на высоковольтной установке преподаватель обученный правилам работы на данной высоковольтной установке и имеющий соответствующую квалификационную группу по технике безопасности.

В соответствии с действующими правилами технической эксплуатации электроустановок [1] и правилами безопасности [2] к высоковольтным установкам предъявляются требования, обеспечивающие безопасное проведение работ: предусмотрены защитные ограждения и заземления, блокировки и сигнализация безопасности, коммутационные аппараты с видимым разрывом в цепях питания источника высокого напряжения, предупредительные знаки и плакаты и т.д.

Принципиальная схема высоковольтной установки для испытания изоляции переменным напряжением представлена на рис. 1.1 лабораторной работы №1. Там же приведено назначение основных элементов высоковольтной установки.

Лабораторные работы проводятся на стационарных установках, в которых выполнены все требования указанные в [1;2]. Для этого удобны портативные аппараты типа АИМ-80 или АИМ-90 производства завода «Мосрентген» или аппарат типа WPOТ 0,25/60 производства VEB TuR из бывшей ГДР.

лографа открывается окно расширенной модели осциллографа. Панель *расширенной* модели осциллографа дополнена тремя информационными табло, на которых выводятся результаты измерений. На экране осциллографа расположены два курсора, обозначенные 1 и 2, при помощи которых можно измерять мгновенные значения напряжения в любой точке осциллографа. Для этого необходимо мышью курсоры за треугольники в их верхней части перевести в требуемое положение. Координаты точек пересечения первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло (Т1), координаты второго курсора – на среднем табло (Т2). На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами первого и второго курсора (Т2-Т1).

Напряжение на входе А в позиции первого курсора обозначено в табло VA1, а входа В – в табло VB1; напряжение на входе А в позиции второго курсора – в табло VA2; а входа В – в табло VB2. Третье табло показывает непосредственно разность величин, соответствующих позициям курсора.

Линейка прокрутки внизу экрана позволяет сдвигать картинку от конца процесса до самого начала.

Расширенная модель осциллографа занимает весь экран. Чтобы вернуться к простому изображению осциллографа, необходимо нажать на кнопку REDUCE в правом нижнем углу расширенной модели осциллографа.

Более подробное описание применения программного комплекса Electronics Workbench V.5.0С можно найти в следующей литературе:

1. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. Изд 3-е, перер. и доп. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003, – 736 с.

2. Панфилов Д. И., Иванов В. С., Чепурин И. Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т./Под общ. ред. Д.И. Панфилова – Т.1: Электротехника. – М.: ДОДЭКА, 1999. – 306с.

Эти аппараты предназначены для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков, но могут использоваться и для испытания твердых диэлектриков на пробой, а также определения разрядных напряжений в воздушных промежутках ограниченных размеров. Наибольшее вторичное переменное напряжение эффективного значения аппарата АИМ-90 составляет 90 кВ, наибольшая потребляемая мощность – 0,65 кВА, масса установки – 35 кг, а аппарата WPOТ 0,25/60 соответственно – 60 кВ; 0,25кВА; 42 кг. Оба аппарата питаются от однофазного переменного тока с напряжением 220 В.

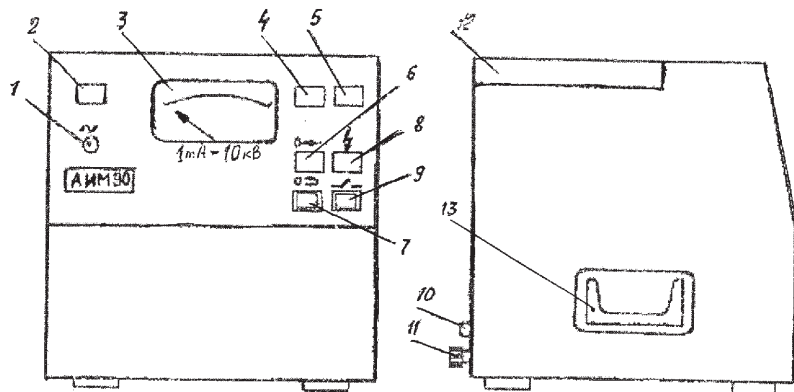


Рис. П. 2.1. Общий вид аппарата АИМ-90.

1 – кнопка «сеть»; 2 – подсветка зеленого сигнала; 3 – измерительный прибор; 4 – подсветка желтого сигнала; 5 – подсветка красного сигнала; 6 – кнопка «возврат стрелки прибора в нулевое положение»; 7 – кнопка «автоматический возврат стрелки прибора в нулевое положение»; 8 – кнопка «высокое напряжение»; 9 – кнопка «прерывание подъема высокого напряжения»; 10 – разъем кабеля питания; 11 – клемма заземления; 12 – защитная крышка; 13 – выдвижная ручка.

Общий вид аппарата АИМ-90 представлен на рис.П.2.1, а аппарата WPOТ 0,25/60 на рис. П.2.2. Принципиальная электрическая схема обоих аппаратов практически не отличаются друг от друга и представлена на рис. П.2.3.

При проведении лабораторных работ №2,3,4 предполагает-

ся использование аппарата АИМ-90, поэтому далее излагается его конструкция и порядок работы на нем.



Рис. П. 2.2. Общий вид аппарата WPOТ 0,25/60

Конструкция аппарата АИМ-90 выполнена в виде переносного пульта и включает в себя следующие основные элементы: генераторное устройство; регулятор напряжения (вариатор) с моторным приводом щетки; испытательную ячейку; защитное

реле; измерительный прибор; сигнальные лампы; кнопки и др.

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

Зона аппарата, где устанавливается ячейка или электроды, имеет открывающуюся прозрачную крышку. Если крышка открывается, то блокировочные контакты отключают высоковольтный трансформатор от сети.

С задней стороны аппарата расположены: штепсельный разъем для подсоединения кабеля питания к сети 220 В; клемма заземления и дверца, обеспечивающая доступ к предохранителям.

Подъем высокого напряжения на электродах производится регулятором напряжения с постоянной скоростью электропривода. Предусмотрена возможность отключения электропривода с целью фиксации высокого напряжения на электродах, т.е. при этом на некоторое время (до 20 сек) высокое напряжение на электродах остается неизменным.

Измерительный прибор (миллиамперметр) отградуирован в киловольтах (1 мА соответствует 10 кВ). Стрелка прибора после электрического пробоя может фиксироваться над измеренным значением, при котором произошел пробой, чем обеспечивается удобный отсчет, или мгновенно переходить в нулевое положение.

В момент электрического пробоя испытуемого диэлектрика защитное реле обеспечивает отключение от сети регулирующего трансформатора и снятие высокого напряжения.

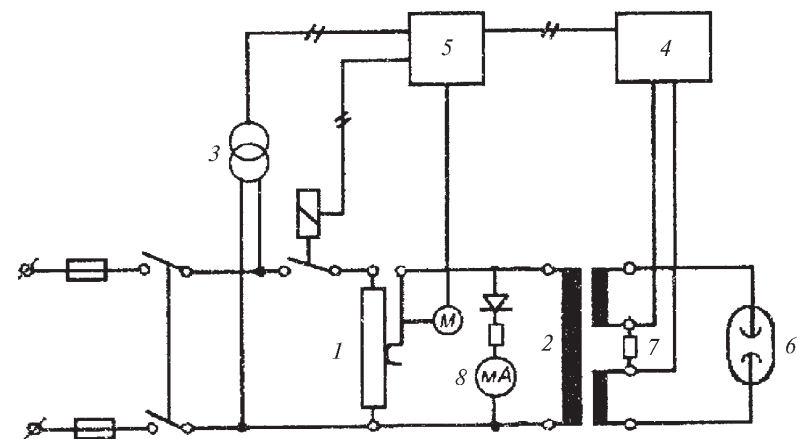


Рис. П. 2.3. Принципиальная электрическая схема аппарата типа АИМ-90 или WROT 0,25/60

1 – регулировочный трансформатор; 2 – высоковольтный трансформатор; 3 – сигнальный трансформатор; 4 – цепь фиксации измерительного прибора; 5 – цепь управления; 6 – испытательная ячейка; 7 – защитное реле; 8 – измерительный прибор.

Правила работы на аппарате АИМ-90 [3].

Работу на аппарате производить стоя на резиновом коврике.

Перед началом работы аппарат должен быть *отсоединен от сети 220В с помощью видимого разрыва* (рубильника или вилки) и обязательно *подсоединен* гибким проводом сечением не менее 4 мм² к заземляющему контуру помещения.

1. Подготовить систему электродов указанную в экспериментальной части соответствующей лабораторной работы.

2. Открыть крышку, установить систему электродов или измерительную ячейку и закрыть крышку.

3. Подсоединить аппарат к сети 220 В с помощью коммутирующего устройства используемого в качестве видимого разрыва.

4. Нажать на кнопку «сеть». При этом должна загореться подсветка зеленого сигнала.

5. Нажать на кнопку «возврат стрелки прибора в нулевое положение». При этом должна загореться подсветка желтого сигнала.

6. Нажать на красную кнопку «высокое напряжение». При этом должна загореться подсветка красного сигнала, а стрелка измерительного прибора указывать на подъем высокого напряжения.

Кратковременно остановить подъем напряжения можно нажатием и удержанием кнопки «прерывание подъема высокого напряжения». После прекращения нажатия этой кнопки подъем напряжения продолжится.

7. После пробоя испытуемого диэлектрика (высокое напряжение аппарат снимет автоматически) и проведения отсчета стрелку измерительного прибора необходимо вернуть в исходное (нулевое) положение для чего нажать на кнопку «возврат стрелки прибора в нулевое положение».

8. Нажать на кнопку «сеть». При этом должна погаснуть подсветка зеленого сигнала.

9. Обеспечить видимый разрыв в цепи питания аппарата от сети 220В.

Внимание! *Открытие защитной крышки* при проведении лабораторных работ для смены, регулировки или других действий с электродами необходимо проводить только *при обеспечении видимого разрыва* в цепи питания аппарата от сети 220 В.

Литература

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
2. Аппарат типа АИМ-90. Паспорт 2ДЕ.169.040 ПС. Завод «Мосрентген».
3. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР.- 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ

Редактор *Г.В.Тимченко*
Компьютерная верстка *А.Ю.Байкова*

Тип. зак.	Изд. зак.168	Тираж 600 экз.
Подписано в печать 3.04.07	Гарнитура NewtonС	Офсет
Усл. печ. л. 3,75		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2