



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Электроснабжение»

Д. И. Зализный

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей**

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,

**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

*Учебное электронное издание
комбинированного распространения*

Гомель 2024

УДК 621.315.6.002.3(075.8)
ББК 31.23я73
3-23

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 28.02.2022 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *В. В. Тодарев*

Зализный, Д. И.
3-23 Электротехнические материалы : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 60 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-531-2.

Предназначен для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электротехнические материалы», где изучаются характеристики диэлектрических и проводниковых материалов. Особое внимание уделено изучению электрической прочности твердых, жидких и газообразных диэлектриков.

Для студентов технических специальностей.

**УДК 621.315.6.002.3(075.8)
ББК 31.23я73**

ISBN 978-985-535-531-2

© Зализный Д. И., 2024
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024

ВВЕДЕНИЕ

Данный практикум по выполнению лабораторных работ предназначен для освоения базовых навыков выполнения измерений различных параметров и характеристик электротехнических материалов.

В рассматриваемых в практикуме лабораторных работах изучаются схемы и методы измерения следующих величин:

токов утечки твердых диэлектриков;

электрической прочности газообразных, жидких и твердых диэлектриков;

тепловых характеристик проводников, полупроводников и изоляционных материалов.

Все лабораторные работы, кроме лабораторной работы № 6, выполняются с использованием высокого напряжения, т. е. 1000 и более вольт. При некоторых измерениях напряжение может достигать 50 кВ. По этой причине в практикуме особое внимание уделяется технике безопасности. В каждой лабораторной работе имеется раздел «Меры по технике безопасности», где подробно описаны мероприятия, которые нужно выполнить перед непосредственным соприкосновением с высоковольтным оборудованием. Студенты не могут быть допущены к выполнению лабораторной работы без предварительной проверки знаний по этому разделу преподавателем!

Лабораторные работы содержат также разделы «Краткие теоретические сведения», «Описание лабораторной установки», «Порядок выполнения работы». Студент должен предварительно изучить информацию, представленную в этих разделах, перед началом выполнения работы.

В процессе выполнения работы необходимо строго следовать заданиям в разделе «Порядок выполнения работы». Перед выполнением очередного пункта задания, этот пункт вначале нужно внимательно и полностью прочитать. В случае недопонимания формулировок в заданиях студент должен обратиться за помощью к преподавателю. Студентам запрещается самостоятельно принимать решения по изменению порядка и методики выполнения лабораторной работы!

В процессе выполнения лабораторных работ каждый студент обязан иметь собственный черновик для записи результатов измерений и расчетов. После окончания работы черновик подписывается преподавателем.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями раздела «Содержание отчета» и результатами, имеющимися в черновике.

Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: исследовать составляющие токов утечки диэлектриков, определить объемное и поверхностное сопротивления различных образцов материалов.

Краткие теоретические сведения

Идеальных диэлектриков в природе не существует. Все диэлектрики в той или иной мере проводят электрический ток, который называют **током утечки**. Этот ток имеет три составляющие:

$$I_{ут} = I_{г} + I_{аб} + I_{ск},$$

где $I_{ут}$ – ток утечки диэлектрика; $I_{г}$ – геометрическая составляющая тока утечки; $I_{аб}$ – ток абсорбции; $I_{ск}$ – сквозной ток.

Каждый диэлектрик может быть представлен в виде электрической схемы замещения (рис. 1.1).

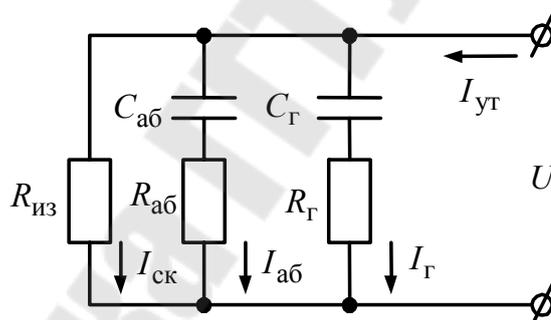


Рис. 1.1. Электрическая схема замещения диэлектрика

Геометрическая составляющая тока утечки обусловлена геометрической формой диэлектрика и не зависит от электрических характеристик диэлектрика. Ток $I_{г}$ является емкостным током и на схеме замещения представлен цепью $R_{г}$ и $C_{г}$. Эквивалентно емкость $C_{г}$ имеет между пластинами вакуум.

Ток абсорбции обусловлен смещением зарядов молекул и атомов диэлектрика в процессе его поляризации.

Ток $I_{аб}$ является емкостным током и на схеме замещения (рис. 1.1) представлен цепью $R_{аб}$ и $C_{аб}$. При этом $R_{аб} \gg R_{г}$; $C_{аб} \gg C_{г}$.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по значению **сквозных токов**. Эти токи имеют место как в постоянном, так и в переменном электрическом поле. Сопротивление диэлектрика сквозному току называют **сопротивлением изоляции** $R_{из}$.

Для твердых диэлектриков сквозной ток имеет две составляющие:

$$I_{ск} = I_S + I_V,$$

где I_S – поверхностный ток утечки; I_V – объемный ток утечки.

Сопротивление изоляции диэлектрика может быть представлено как параллельное соединение поверхностного R_S и объемного R_V сопротивлений:

$$R_{из} = \frac{R_S \cdot R_V}{R_S + R_V}. \quad (1.1)$$

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимости различных материалов пользуются значениями **удельного объемного сопротивления** ρ_V и **удельного поверхностного сопротивления** ρ_S .

В системе СИ удельное объемное сопротивление ρ_V равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала (если ток проходит сквозь куб от одной его грани к противоположной), умноженному на 1 м:

$$\rho_V = \frac{R_V \cdot S}{h}, \quad \text{Ом} \cdot \text{м}, \quad (1.2)$$

где S – площадь поверхности электрода, прикасающаяся к диэлектрику; h – толщина образца диэлектрика.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через этот квадрат от одной его стороны к противоположной:

$$\rho_S = \frac{R_S \cdot b}{l}, \text{ Ом,} \quad (1.3)$$

где b – ширина электродов; l – расстояние между электродами.

Переходный процесс при приложении постоянного напряжения к диэлектрику приведен на рис. 1.2.

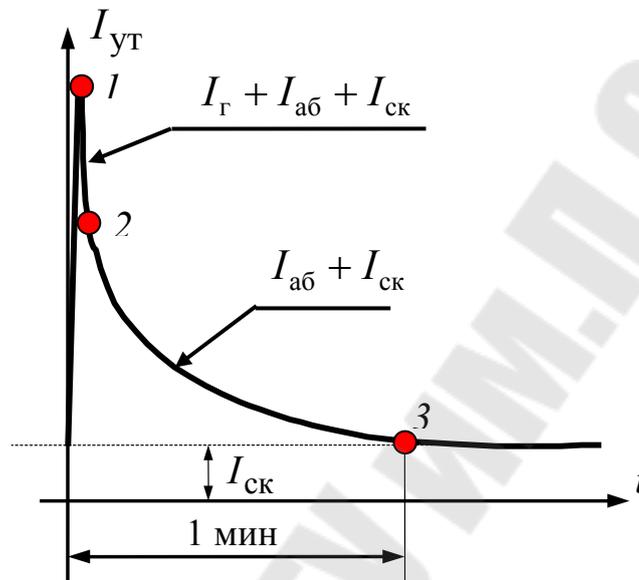


Рис. 1.2. График изменения тока утечки диэлектрика при приложении к нему постоянного напряжения

В момент подачи напряжения ток через диэлектрик возрастает скачком до суммы $I_{\Gamma} + I_{аб} + I_{ск}$ (точка 1 на графике). Затем геометрический ток быстро снижается до нуля, и результирующий ток представляет собой сумму $I_{аб} + I_{ск}$ (точка 2 на графике).

Ток утечки достигает своего установившегося значения $I_{ск}$ приблизительно через 60 с после приложения напряжения (точка 3 на графике).

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 1.3.

Лабораторная установка состоит из лабораторного стенда 1 и установки для высоковольтных электродов 2.

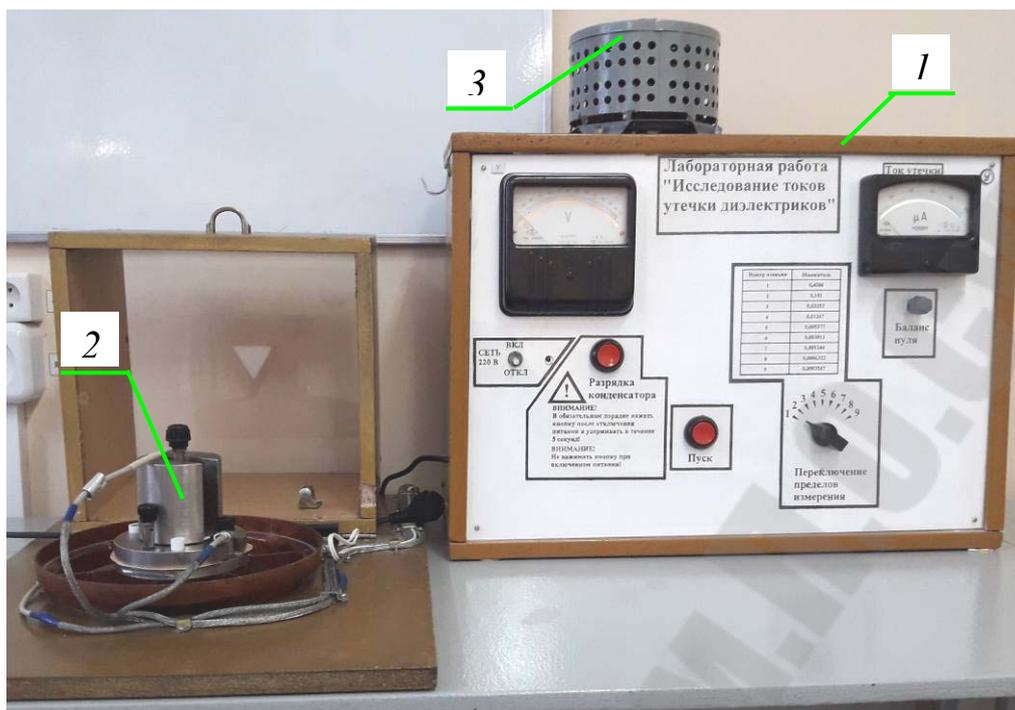


Рис. 1.3. Внешний вид лабораторной установки:
 1 – лабораторный стенд; 2 – установка для высоковольтных электродов; 3 – ЛАТР

Установка работает следующим образом.

Сетевое напряжение 220 В через тумблер «Сеть» подается на регулировочный автотрансформатор (ЛАТР) 3, расположенный в верхней части стенда и позволяющий регулировать значение напряжения, подаваемого на испытуемый образец.

При включении тумблера «Сеть» начинает светиться сигнальная лампа. Напряжение, снимаемое с вторичной обмотки ЛАТРа, контролируется с помощью вольтметра, выведенного на лицевую панель стенда. Это же напряжение подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, на вторичной обмотке которого формируется высокое напряжение значением до 1 кВ. Высокое напряжение выпрямляется с помощью диодного моста и сглаживается высоковольтным конденсатором. После отключения питания конденсатор продолжает хранить напряжение. Поэтому для его разрядки предусмотрена кнопка «Разрядка конденсатора», которую можно нажимать только при отключенном питании.

В процессе изменения значения напряжения с помощью ЛАТРа напряжение можно только повышать. Если напряжение случайно выставлено выше, чем требуется, то при его понижении высоковольтный конденсатор останется заряженным предыдущим максимальным

напряжением, что в дальнейшем приведет к некорректным измерениям. Таким образом, выставленное значение напряжения необходимо либо оставить, либо снизить до нуля, отключить питание стенда тумблером, разрядить высоковольтный конденсатор, включить питание и выставить требуемое значение напряжения.

Высоковольтное постоянное напряжение подается на исследуемый образец диэлектрика через нажатую кнопку «Пуск». В случае отпущения кнопки «Пуск» напряжение на диэлектрик не подается. Значение этого напряжения **в вольтах** рассчитывается по формуле

$$U_{\text{д}} = 6,63 \cdot U_{\text{в}}, \quad (1.4)$$

где $U_{\text{в}}$ – показания вольтметра на лабораторном стенде, В.

Ток утечки диэлектрика измеряется с помощью электронного усилителя, коэффициент усиления которого можно изменять с помощью переключателя «Переключение пределов измерения», выведенного на лицевую панель стенда. К выходу усилителя подключен микроамперметр, показания которого пропорциональны току утечки диэлектрика. Напряжение смещения усилителя (статическую ошибку) можно скомпенсировать с помощью регулятора «Баланс нуля», выведенного на лицевую панель стенда.

Для того чтобы получить значение тока утечки **в микроамперах**, необходимо показания микроамперметра умножать на коэффициент K , значения которого зависят от положения переключателя «Переключение пределов измерения». Эти значения приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения масштабных коэффициентов для различных пределов измерения

Номер позиции переключателя «Переключение пределов измерения»	K
1	0,4386
2	0,101
3	0,03252
4	0,01267
5	0,005577
6	0,003011
7	0,001214
8	0,0006322
9	0,0003267

На рис. 1.4 приведен чертеж установки с высоковольтными электродами.

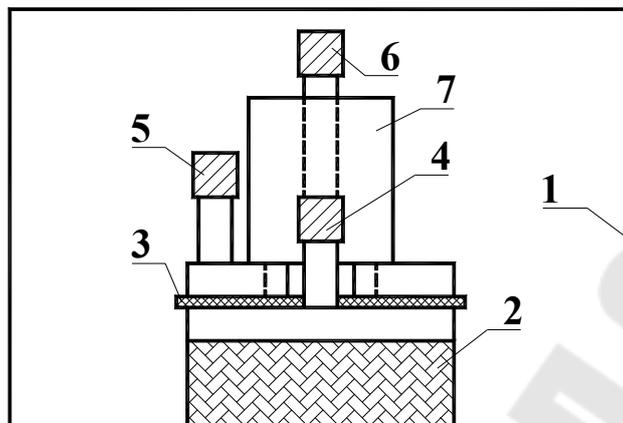


Рис. 1.4. Установка с высоковольтными электродами:
1 – защитное ограждение; 2 – подставка; 3 – исследуемый диэлектрик; 4 – нижний электрод; 5 – охранный кольцо; 6 – верхний электрод; 7 – груз

Испытуемый образец диэлектрика размещают между верхним электродом 6 совместно с охранным кольцом 5 и нижним электродом 4. Для обеспечения контакта сверху ставят груз 7.

Если провода № 3 и № 2 подключить между верхним и нижним электродами, то через диэлектрик начнет протекать объемный ток. При этом охранный кольцо ограничивает пути протекания поверхностного тока утечки.

Если провода № 3 и № 2 подключить между верхним электродом и охранным кольцом, то через диэлектрик начнет протекать поверхностный ток.

Меры по технике безопасности

В лабораторном стенде используется потенциально опасное для жизни напряжение, достигающее значения 1 кВ.

Прежде, чем открыть защитное ограждение установки с высоковольтными электродами, и перед началом работы необходимо выполнить следующие меры по технике безопасности.

1. Установить регулятор ЛАТРа в положение «Минимум».
2. Установить тумблер «Сеть» в положение «Отключено».
3. Нажать кнопку «Разрядка конденсатора» и удерживать несколько секунд.

4. Отсоединить вилку шнура питания лабораторного стенда от розетки.

Внимание! Строго запрещается проводить измерения при открытой крышке защитного ограждения высоковольтных электродов.

Внимание! После сборки схемы ее нужно показать преподавателю.

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомьтесь с краткими теоретическими сведениями.
2. Внимательно изучите описание лабораторной установки.
3. Выучите меры по технике безопасности.
4. Ознакомьтесь с ходом работы и приготовьте необходимые таблицы для измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

Подготовка к измерениям

1. Получите у преподавателя необходимый образец диэлектрика и измерьте микрометром его толщину h .

2. Выполните мероприятия по технике безопасности, откройте установку с высоковольтными электродами, разберите ее, и измерьте диаметр d_1 верхнего электрода, а также диаметр отверстия в охранном кольце d_2 . Рассчитайте площадь поверхности верхнего электрода S .

3. Соберите установку с высоковольтными электродами, разместив туда требуемый образец диэлектрика. Провода пока не подключайте.

Исследование объемных токов утечки диэлектрика

4. Соберите схему для измерения объемных токов утечки. Для этого подключите провод № 3 к верхнему электроду, а провод № 2 – к нижнему электроду. Продемонстрируйте схему преподавателю. Закройте защитное ограждение.

5. Включите питание стенда.

6. С помощью ЛАТРа установите значение напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора, заданное преподавателем. При этом **напряжение можно только повышать**. Если напряжение случайно выставлено выше, чем требуется, то его необходимо либо оставить на этом значении, либо снизить до нуля, отключить питание стенда тумблером, разрядить высоковольтный конденсатор, включить питание и выставить требуемое значение напряжения.

7. По формуле (1.4) рассчитайте значение напряжения, которое будет подано на испытуемый образец диэлектрика.

8. Перед проведением измерений необходимо подобрать наилучший предел измерения. Для этого установите переключатель пределов измерения в положение № 1.

9. Нажмите кнопку «Пуск» и, не отпуская ее, следите за движением стрелки микроамперметра. Отпустите кнопку «Пуск».

10. Если в момент начального броска тока стрелка отклонилась незначительно, или не перешла за середину шкалы, то нужно перейти к пределам № 2, № 3 и т. д. Если же на некотором пределе стрелка при начальном броске вышла за пределы шкалы, то необходимо вернуться к предыдущему пределу измерения.

11. После подбора предела измерения далее необходимо выполнить требуемые измерения. Для этого вначале подождите 1–2 мин до завершения процесса окончания зарядки высоковольтного конденсатора после предыдущих действий.

12. Приготовьте ручной секундомер.

13. Нажмите кнопку «Пуск», одновременно запустив секундомер, и, не отпуская ее, следите за движением стрелки микроамперметра. Зафиксируйте **три точки** переходного процесса (см. рис. 1.2): значения токов в момент броска стрелки, ее быстрого возврата назад (по среднему значению инерционных колебаний) и установившего значения, когда медленное движение стрелки прекратится. Длительность переходного процесса может составлять около 60 с. В случае неудачных измерений повторить их можно не ранее, чем через 1–2 мин.

14. Рассчитайте полученные значения токов утечки (в точках № 1, № 2 и № 3 по рис. 1.2) с учетом масштабирующего коэффициента на выбранном пределе измерения.

15. Выждав 1–2 мин, повторите п. 13–14 еще 2 раза.

16. Рассчитайте средние значения полученных токов, приняв их как окончательные.

17. Сведите результаты измерений в таблицу.

18. В отчете постройте график переходного процесса для тока утечки диэлектрика по аналогии с рис. 1.2.

19. Установите регулятор ЛАТРа в положение «Минимум». Отключите питание стенда. Разрядите высоковольтный конденсатор.

20. На основе полученного установившегося значения тока $I_{ск} = I_V$ рассчитайте в отчете объемное сопротивление диэлектрика по формуле $R_V = \frac{U_d}{I_V}$, где напряжение U_d рассчитывается по формуле (1.4).

21. Рассчитайте в отчете удельное объемное сопротивление диэлектрика по формуле (1.2), приняв в качестве значения S площадь поверхности верхнего электрода. Расчеты ведите в единицах СИ!

Исследование поверхностных токов утечки

22. Выполните мероприятия по технике безопасности и соберите схему для измерения поверхностных токов утечки. Для этого подключите провод № 3 к верхнему электроду, а провод № 2 – к охранному кольцу. Продемонстрируйте схему преподавателю. Закройте защитное ограждение.

23. Повторите п. 5–18.

24. На основе полученного установившегося значения тока $I_{ск} = I_S$ рассчитайте в отчете поверхностное сопротивление диэлектрика по формуле $R_S = \frac{U_d}{I_S}$.

25. Рассчитайте в отчете удельное поверхностное сопротивление диэлектрика по формуле $\rho_S = \frac{R_S \cdot b}{l}$, где $l = \frac{d_2 - d_1}{2}$ – длина пути утечки; $b = \pi \frac{d_2 + d_1}{2}$ – длина средней окружности между верхним электродом и охранным кольцом (эквивалентная ширина электродов). Расчеты ведите в единицах СИ!

26. Рассчитайте в отчете полное сопротивление изоляции диэлектрика по формуле (1.1).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие комментарии к ходу работы.
3. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
4. Расчетные формулы и результаты расчетов.
5. Выводы по результатам измерений с анализом полученных значений токов и сопротивлений.

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация диэлектрика? Изобразите поляризованный диэлектрик.
2. В чем физический смысл относительной диэлектрической проницаемости?
3. Какие виды поляризации диэлектриков вы знаете?
4. Какие составляющие токов утечки диэлектриков вы знаете?
5. Как изображается схема замещения диэлектрика?
6. Какова природа геометрического тока, и в каких видах электрических полей он протекает?
7. Почему возникает ток абсорбции, и в каких видах электрических полей он протекает?
8. Чем обусловлен сквозной ток диэлектрика? В каких видах электрических полей он протекает?
9. Как объяснить форму переходного процесса тока утечки диэлектрика при подаче на него постоянного напряжения?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУХА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Цель работы: ознакомиться с физическими процессами, протекающими при пробое воздушного промежутка в переменном неоднородном электрическом поле.

Краткие теоретические сведения

Воздух является естественной изоляцией многих высоковольтных устройств: воздушных линий электропередачи, силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей и других.

Как диэлектрик воздух имеет следующие положительные свойства:

- быстро восстанавливает свою электрическую прочность после пробоя;

- отсутствие старения, т. е. ухудшения свойств с течением времени;

- низкое значение диэлектрической проницаемости;

- малые диэлектрические потери.

Отрицательными свойствами воздуха как диэлектрика являются:

- невозможность использования его для закрепления деталей устройств;

- невысокая электрическая прочность;

- способность увлажняться, образовывать окислы и поддерживать горение;

- низкая теплопроводность.

Электрическая прочность воздуха не является величиной постоянной, а зависит от давления, относительной влажности, формы электродов и расстояния между ними, от вида напряжения, а также от полярности электродов. Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение.

Пробоем называется явление, приводящее к длительному или кратковременному образованию канала с высокой электрической проводимостью. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – электрической прочностью диэлектрика.

Электрическая прочность $E_{\text{ПР}}$ газового промежутка в переменном электрическом поле определяется по амплитудному значению напряжения пробоя по формуле

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР.RMS}} \cdot \sqrt{2}}{h}, \text{ кВ/мм}, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{ПР.RMS}}$ – действующее значение напряжения, при котором происходит пробой газового промежутка, кВ; h – расстояние между электродами, мм.

Электрическую прочность воздуха в переменном электрическом поле определяют с помощью **шаровых разрядников**, т. е. разрядников, электроды которых имеют форму шара. Такая форма электродов приводит к появлению **неоднородного поля** (рис. 2.1), аналогичного тому, которое существует возле проводников с круглым сечением. Чем меньше диаметр шара, тем сильнее неоднородность поля.

Шаровые разрядники имитируют форму поля, возникающую вокруг проводов высоковольтных воздушных линий электропередачи.

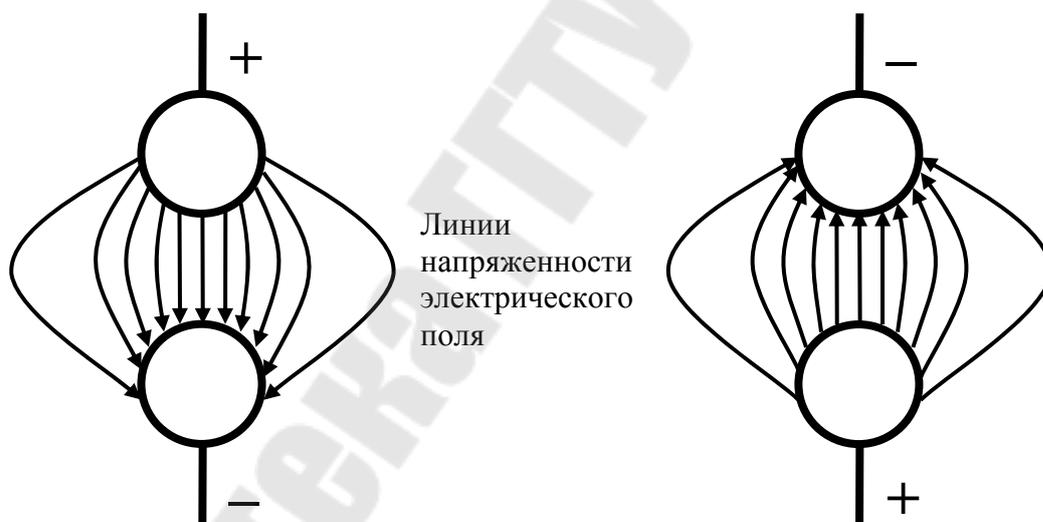


Рис. 2.1. Форма электрического поля возле шарового разрядника в переменном поле

Пробой газового промежутка возможен при возникновении в нем достаточного количества свободных носителей заряда (электронов и ионов). Процесс образования свободных носителей заряда в газах называется **ионизацией газа**.

Различают следующие механизмы ионизации: автоионизация, ударная ионизация, фотоионизация, термоионизация.

Автоионизация – это процесс отрыва электронов от атомов газа под действием электрического поля.

Ударная ионизация – это процесс выбивания электронов из атомов другими свободными электронами, образовавшимися в результате других видов ионизации.

Фотоионизация – это процесс выбивания электронов из атомов фотонами, образовавшимися в результате ударной ионизации.

Термоионизация – это процесс отрыва электронов от атомов из-за высокой температуры в газовом промежутке.

Процесс пробоя в переменном поле развивается следующим образом. При напряжении, близком к напряжению пробоя, вначале возникает автоионизация, а затем ударная ионизация и фотоионизация. В результате формируются лавины (участки с большой концентрацией) электронов, устремляющихся к аноду, т. е. положительному электроду. В противоположном направлении, т. е. к катоду, движутся более медленные положительные ионы. Таким образом, между анодом и катодом формируется электропроводящий канал, который называется **стример** или лидер.

Когда положительные ионы достигают катода, они начинают выбивать из него множество заряженных частиц. Процесс поддерживается термоионизацией из-за растущей температуры. В результате между анодом и катодом формируется **плазменный канал** – ярко светящийся участок «огня» между электродами.

При смене полярности напряжения, которая на частоте 50 Гц происходит 50 раз в секунду, анодом и катодом, соответственно, становятся противоположные электроды. При этом плазменный канал не успевает погаснуть полностью, так как между электродами сохраняется большая концентрация заряженных частиц при высокой температуре. Эти частицы тут же устремляются в противоположном направлении, и плазменный канал вновь набирает силу.

Плазменный канал длительностью менее 1 с называется **искрой**, а более 1 с – **электрической дугой**.

На рис. 2.2 показана зависимость напряжения пробоя газа от расстояния между электродами.

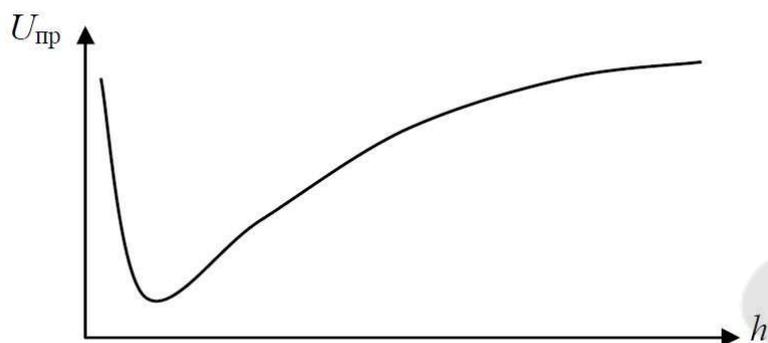


Рис. 2.2. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами

При малых расстояниях между электродами снижается длина свободного пробега частиц, а при больших расстояниях – вероятность ударной ионизации. В обоих случаях электрическая прочность воздуха возрастает.

Описание лабораторной установки

Аппарат АИД-70М

Для определения электрической прочности воздушного промежутка в лабораторной работе используется аппарат испытания диэлектриков АИД-70М (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Общий вид аппарата испытания диэлектриков:
1 – высоковольтный генератор; 2 – пульт управления

Аппарат состоит из высоковольтного генератора 1 и пульта управления 2.

Высоковольтный генератор позволяет получать напряжения с действующим значением до 50 кВ на переменном напряжении и напряжения с амплитудным значением до 70 кВ – на постоянном напряжении. Корпус генератора заполнен трансформаторным маслом, являющимся электроизолятором и теплоносителем. На корпусе имеется клемма для подключения защитного заземления.

Пульт управления выполнен в пластиковом корпусе. На панели лицевой пульта управления аппарата (рис. 2.4) размещены: цифровые индикаторы «kV» и «mA», сетевой выключатель, кнопки управления с надписями о функциональном назначении, ручка регулирования высокого напряжения.



Рис. 2.4. Лицевая панель пульта управления аппарата:

- 1 – цифровой индикатор выходного напряжения (kV);
- 2 – цифровой индикатор выходного тока (mA);
- 3 – сетевой выключатель;
- 4 – кнопка включения работы аппарата в режиме постоянного тока и предела измерения 10 mA;
- 5 – кнопка включения работы аппарата в режиме переменного тока и предела измерения 50 mA;
- 6 – кнопка отключения высокого напряжения;
- 7 – кнопка включения высокого напряжения;
- 8 – ручка регулятора высокого напряжения;
- 9 – сигнальный индикатор включения высокого напряжения

На индикаторе «kV» отображается напряжение, прикладываемое к диэлектрику на стороне высокого напряжения, кВ, а на индикаторе «mA» – отображается ток, протекающий через диэлектрик на стороне высокого напряжения, mA.

Внутри корпуса пульта управления установлен автотрансформатор, подсоединенный через привод к ручке регулирования высокого напряжения 8 на лицевой панели.

Программное обеспечение прибора осуществляет управление высоковольтным генератором, отображение измеренных величин, а также защиту от перегрузки. Если ток, протекающий через диэлектрик в переменном поле, превышает 50 мА, то срабатывает защита и отключает напряжение на генераторе.

Выбор вида выдаваемого напряжения (переменное или постоянное) осуществляется кнопками 4 и 5.

Высокое напряжение на выходе генератора появляется в момент нажатия на кнопку 7 при нахождении ручки 8 в положении «Минимум». При этом подается звуковой сигнал и начинает светиться индикатор 9. Для отключения высокого напряжения необходимо нажать на кнопку 6.

Оборудование за оградительной сеткой

За оградительной сеткой расположены высоковольтный генератор аппарата АИД-70М и воздушный разрядник (рис. 2.5), на котором установлены металлические штыри с резьбой для подсоединения шаровых электродов. Имеются шары большого, среднего и малого диаметров. На разряднике закреплена линейка и указатель для определения расстояния между электродами.



Рис. 2.5. Шаровой разрядник

Внимание! Шары большого диаметра имеют значительный вес. При обращении с ними необходимо прилагать достаточные усилия и осторожность.

Внимание! Длительность горения электрической дуги между электродами не должна превышать 3 с!

Внимание! Напряжение между электродами не должно превышать 40 кВ!

Меры по технике безопасности

1. Включение лабораторного стенда разрешается только с разрешения преподавателя.

2. Перед тем как зайти за ограждение, необходимо выполнить следующие технические мероприятия, обеспечивающие безопасность проведения работ:

2.1. Вывести на нуль регулятор напряжения на пульте управления.

2.2. Убедиться, что сигнальный индикатор включения высокого напряжения не светится. В противном случае отключить высокое напряжение.

2.3. Отключить питание пульта управления тумблером.

2.4. Создать видимый разрыв между пультом управления и источником питания (вынуть шнур питания из розетки).

2.5. Открыть дверь ограждения и убедиться, что сигнальная лампа, находящаяся над ней, погасла.

2.6. С помощью изолированной штанги наложить заземление на неокрашенные части высоковольтных электродов установки в течение 1–2 с для снятия остаточного статического заряда.

3. Закрывание двери ограждения можно производить только в случае отсутствия людей за ограждением.

4. Убедиться, что после закрытия двери начала светиться сигнальная лампа, находящаяся над ней.

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.

2. Изучить меры по технике безопасности.

3. Ознакомиться с ходом работы.

4. Подготовить таблицу для внесения результатов измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

Экспериментальные исследования

1. Выполнив необходимые мероприятия по технике безопасности, закрепите на разряднике электроды в соответствии с табл. 2.1, установите соответствующее расстояние между ними и выровняйте их по вертикали.

Таблица 2.1

**Форма электродов и расстояние между ними
в соответствии с номером варианта**

Номер варианта	Форма электродов	h, см			
1	Большой шар – большой шар; средний шар – большой шар	0,9	1,1	1,3	1,5
2	Средний шар – средний шар; малый шар – средний шар	1,0	1,2	1,4	1,6
3	Большой шар – большой шар; малый шар – большой шар	0,8	1,0	1,2	1,4
4	Малый шар – малый шар; средний шар – малый шар	1,1	1,3	1,5	1,7
5	Большой шар – большой шар; большой шар – малый шар	1,0	1,2	1,4	1,5

2. Выйдите из высоковольтной ячейки и закройте двери ограждения.

3. Включите питание аппарата АИД-70М. Дождитесь окончания процесса загрузки прибора.

4. Установите переменное напряжение испытаний.

5. Включите подачу высокого напряжения. Убедитесь, что индикатор высокого напряжения начал светиться.

6. Медленно повышайте регулятором напряжение (не быстрее 2 кВ в секунду) и наблюдайте за электродами и показаниями индикатора напряжения.

7. В момент пробоя зафиксируйте значение напряжения пробоя.

Внимание! Длительность горения электрической дуги не должна превышать 3 с! Снижайте напряжение вручную, если защита не отключила высокое напряжение!

8. Запишите полученное действующее значение переменного напряжения пробоя в табл. 2.2.

9. Не выключая прибора, проведите измерения еще 2 раза.

10. Повторите измерения для всех требуемых расстояний между электродами и форм электродов, соблюдая меры по технике безопасности.

11. При наибольшем по заданию расстоянии между электродами процесс формирования электрической дуги необходимо сфотографировать или снять на видео. **Внимание!** Запрещено помещать смартфоны за защитным ограждением! Также словесно опишите наблюдаемые явления (внешний вид дуги, звук, запах и т. д.).

12. Отключите лабораторную установку.

Расчеты

1. Рассчитайте средние действующие значения напряжений пробоя для каждого расстояния между электродами.

2. Рассчитайте электрическую прочность воздуха для каждого расстояния между электродами по формуле (2.1) на основе рассчитанных средних действующих значений напряжений пробоя.

3. Постройте кривые зависимости $E_{\text{ПР}} = f(h)$ для обеих форм электродов на одной координатной плоскости.

4. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Таблица 2.2

Образец заголовка таблицы результатов

Номер эксперимента	Изменяемые значения величин				Вычисленные значения величин	
	$U_{\text{ПР.RMS.1}}$, кВ	$U_{\text{ПР.RMS.2}}$, кВ	$U_{\text{ПР.RMS.3}}$, кВ	h , мм	$U_{\text{ср}}$, кВ	$E_{\text{ПР}}$, кВ/мм
1						
...						

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие комментарии к ходу работы.
3. Описание наблюдаемых явлений в процессе экспериментов.

4. Таблицы с данными измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей $E_{\text{пр}} = f(h)$.
6. Выводы по результатам измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Назовите положительные и отрицательные свойства воздуха как диэлектрика. Приведите примеры применения воздуха как изоляционной среды.
2. Как рассчитывается электрическая прочность воздуха в переменном электрическом поле?
3. Какие виды ионизации наблюдаются в процессе формирования пробоя воздуха?
4. Что такое стример?
5. Что такое плазменный канал?
6. Как формируется электрическая дуга в переменном поле?
7. Для чего применены шарообразные электроды в лабораторной работе?
8. Назовите основные узлы аппарата испытания диэлектриков АИД-70М.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУХА В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Цель работы: ознакомиться с физическими процессами, протекающими при пробое воздушного промежутка в постоянном резконеоднородном электрическом поле.

Краткие теоретические сведения

Электрическая прочность газового промежутка в постоянном поле определяется по выражению

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{h}, \text{ кВ/мм}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – напряжение, при котором происходит пробой газового промежутка, кВ; h – расстояние между электродами, мм.

Резко неоднородное поле появляется в газовых промежутках с электродами типа «игла – плоскость», «провод – провод», «провод – земля» и т. п. В таких условиях наибольшая напряженность поля появляется у электрода с малым радиусом кривизны (рис. 3.1, а). Если в этой области напряженность поля достигнет критического значения, при котором начинается **ударная ионизация** (см. теоретические сведения по лабораторной работе № 2), то возникает особая форма разряда, называемая **коронным разрядом**.

Коронный разряд выглядит в виде светящего голубого ореола у острия. С увеличением напряженности поля плотность электронных лавин настолько возрастает, что фотоны, излучаемые лавинами, приобретают энергию достаточную для осуществления **фотоионизации** газа. Образуются новые лавины впереди породивших их начальных лавин. И так последовательно увеличивается число лавин. В итоге появляется тонкий проводящий канал, который называется **стримером** (лидером). Далее стримерный канал заполняется плазмой, т. е. формируется **электрическая дуга**. Кратковременную электрическую дугу называют **искрой**.

Подвижность положительных ионов, образовавшихся в процессе ионизации, намного меньше подвижности электронов, так как их

масса примерно на 3 порядка больше массы электронов. Поэтому при движении стримера образуется «облако» положительного объемного заряда, расположенного вблизи острия иглы (рис. 3.1, б).

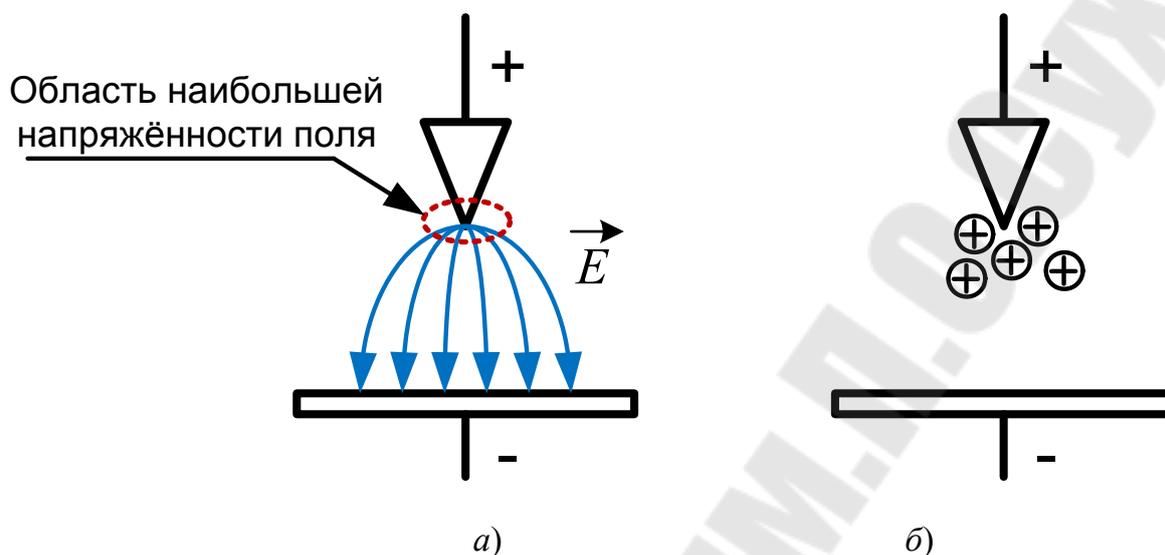


Рис. 3.1. Явления вблизи электродов «игла – плоскость»:
 а – распределение линий напряжённости электрического поля;
 б – скопление положительных ионов у острия положительно заряженной иглы

Если полярность иглы положительная, то положительный объемный заряд, суммируясь с внешним электрическим полем источника питания, увеличивает результирующую напряженность поля вблизи острия и приближает этот максимум к противоположному электроду. И, как следствие, уменьшается пробивное напряжение промежутка «игла – плоскость».

При отрицательной полярности иглы объемный заряд вычитается из внешнего поля. Результирующая напряженность уменьшается, а пробивное напряжение промежутка растет.

Описанные явления снижения электрической прочности воздуха в постоянном электрическом поле применяют в электродуговой сварке.

Описание лабораторной установки

Аппарат АИД-70М

Для определения электрической прочности воздушного промежутка в лабораторной работе используется аппарат испытания диэлектриков АИД-70М (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Общий вид аппарата испытания диэлектриков

Аппарат состоит из высоковольтного генератора *1* и пульта управления *2*.

Высоковольтный генератор позволяет получать напряжения с действующим значением до 50 кВ на переменном напряжении и напряжения с амплитудным значением до 70 кВ – на постоянном напряжении.

Корпус генератора заполнен трансформаторным маслом, являющимся электроизолятором и теплоносителем. На корпусе имеется клемма для подключения защитного заземления.

Пульт управления выполнен в пластиковом корпусе. На панели лицевой пульта управления аппарата (рис. 3.3) размещены: цифровые индикаторы «кV» и «mA», сетевой выключатель, кнопки управления с надписями о функциональном назначении, ручка регулирования высокого напряжения.

На индикаторе «кV» отображается напряжение, прикладываемое к диэлектрику на стороне высокого напряжения, кВ, а на индикаторе «mA» – отображается ток, протекающий через диэлектрик на стороне высокого напряжения, mA.

Внутри корпуса пульта управления установлен автотрансформатор, подсоединенный через привод к ручке регулирования высокого напряжения *8* на лицевой панели.

Программное обеспечение прибора осуществляет управление высоковольтным генератором, отображение измеренных величин,

а также защиту от перегрузки. Если ток, протекающий через диэлектрик в постоянном поле, превышает 10 мА, то срабатывает защита и отключает напряжение на генераторе.

Выбор вида выдаваемого напряжения (переменное или постоянное) осуществляется кнопками 4 и 5.

Высокое напряжение на выходе генератора появляется в момент нажатия на кнопку 7 при нахождении ручки 8 в положении «минимум». При этом подается звуковой сигнал и начинает светиться индикатор 9. Для отключения высокого напряжения необходимо нажать на кнопку 6.

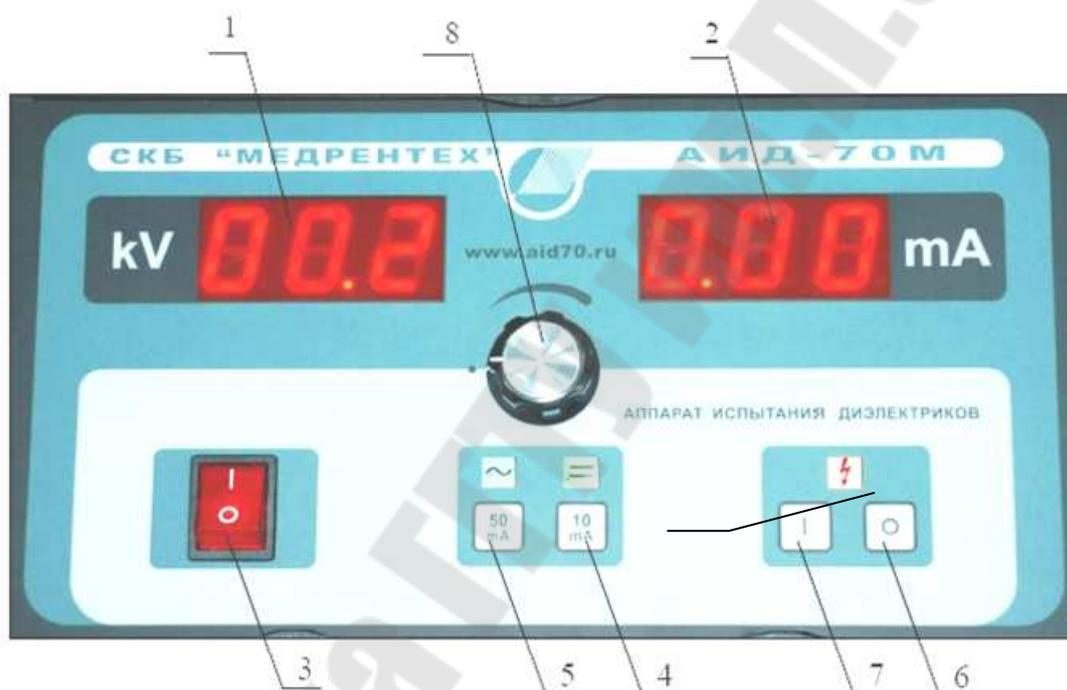


Рис. 3.3. Лицевая панель пульта управления аппарата:

- 1 – цифровой индикатор выходного напряжения (кV);
- 2 – цифровой индикатор выходного тока (мА);
- 3 – сетевой выключатель;
- 4 – кнопка включения работы аппарата в режиме постоянного тока и предела измерения 10 мА;
- 5 – кнопка включения работы аппарата в режиме переменного тока и предела измерения 50 мА;
- 6 – кнопка отключения высокого напряжения;
- 7 – кнопка включения высокого напряжения;
- 8 – ручка регулятора высокого напряжения;
- 9 – сигнальный индикатор включения высокого напряжения

Оборудование за оградительной сеткой

За оградительной сеткой расположены высоковольтный генератор аппарата АИД-70М и воздушный разрядник, на котором установ-

лены металлические электроды с резьбой (рис. 3.4). Имеются электроды двух типов: игла и плоскость. На разряднике закреплена линейка и указатель для определения расстояния между электродами.



Рис. 3.4. Воздушный разрядник

На постоянном испытательном напряжении верхний электрод разрядника является отрицательным, а нижний положительный электрод заземлен.

Для смены полярности поля необходимо открутить электроды от штырей и, поменяв их местами, снова прикрутить.

Внимание! Длительность горения электрической дуги между электродами не должна превышать 3 с! В случае длительного горения дуги необходимо снизить напряжение до минимума.

Внимание! Напряжение между электродами не должно превышать 40 кВ!

Меры по технике безопасности

1. Включение лабораторного стенда разрешается только с разрешения преподавателя.

2. Перед тем как зайти за ограждение, необходимо выполнить следующие технические мероприятия, обеспечивающие безопасность проведения работ.

- 2.1. Вывести на нуль регулятор напряжения на пульте управления.
- 2.2. Убедиться, что сигнальный индикатор включения высокого напряжения не светится. В противном случае отключить высокое напряжение.
- 2.3. Отключить питание пульта управления тумблером.
- 2.4. Создать видимый разрыв между пультом управления и источником питания (вынуть шнур питания из розетки).
- 2.5. Открыть дверь ограждения и убедиться, что сигнальная лампа, находящаяся над ней, погасла.
- 2.6. С помощью изолированной штанги наложить заземление на высоковольтные выводы установки в течение 1–2 с для снятия остаточного статического заряда.
3. Закрывание двери ограждения можно производить только в случае отсутствия людей за ограждением.
4. Убедиться, что после закрытия двери начала светиться сигнальная лампа, находящаяся над ней.

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.
2. Изучить меры по технике безопасности.
3. Ознакомиться с ходом работы.
4. Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

Измерения при форме электродов «плоскость – игла»

1. При выключенной установке, соблюдая меры по технике безопасности, закрепите на разряднике электроды по схеме «плоскость – игла», т. е. к отрицательному (верхнему) электроду присоедините иглу, а к положительному (нижнему) электроду – плоскость.
2. В соответствии с вариантом задания установите расстояние между электродами для первого измерения в соответствии с табл. 3.1.

Расстояния между электродами в сантиметрах

Номер варианта	Номер опыта			
	1	2	3	4
1	1,2	1,8	2,2	2,8
2	1,3	2,0	2,5	2,9
3	1,0	1,5	2,5	3,0
4	1,5	2,0	2,6	2,9
5	1,6	2,2	2,7	3,0

3. Выйдите из высоковольтной ячейки и закройте двери ограждения.

4. Включите питание аппарата АИД-70М. Дождитесь окончания процесса загрузки прибора.

5. Установите **постоянное** напряжение испытаний.

6. Включите подачу высокого напряжения. Убедитесь, что индикатор высокого напряжения начал светиться.

7. Медленно повышайте регулятором напряжение (не быстрее 2 кВ в секунду) и наблюдайте за электродами и показаниями индикатора напряжения.

8. В момент пробоя зафиксируйте значение напряжения пробоя.

Внимание! Длительность горения электрической дуги не должна превышать 3 с! Снижайте напряжение вручную, если защита не отключила высокое напряжение!

9. Запишите полученное значение напряжения пробоя в табл. 3.2.

10. Не выключая прибора, проведите измерения еще 2 раза.

11. Повторите измерения для всех требуемых расстояний между электродами по табл. 3.1, соблюдая меры по технике безопасности.

12. При наибольшем по заданию расстоянии между электродами процесс формирования электрической дуги необходимо сфотографировать или снять на видео. **Внимание!** Запрещено помещать смартфоны за защитным ограждением! Также словесно опишите наблюдаемые явления (внешний вид дуги, звук, запах и т. д.).

Измерения при форме электродов «игла – плоскость»

13. При выключенной установке, соблюдая меры по технике безопасности, закрепите на разряднике электроды по схеме «игла – плоскость», т. е. к отрицательному (верхнему) электроду присоедините плоскость, а к положительному (нижнему) электроду – иглу.

14. Повторите п. 3–12. Результаты заносите в отдельную таблицу, аналогичную табл. 3.2.

15. При наибольшем по заданию расстоянии между электродами проведите опыт с коронным разрядом. Для этого повышайте напряжение между электродами до границы пробоя, но не до самого пробоя. В этих условиях попытайтесь рассмотреть форму коронного разряда на конце иглы. Сфотографируйте или зарисуйте это явление. Также словесно опишите его.

Расчеты

16. Рассчитайте средние значения напряжений пробоя для каждого расстояния между электродами.

17. Определите электрическую прочность воздуха для каждого расстояния между электродами по формуле (3.1) на основе рассчитанных средних значений напряжений пробоя.

18. Постройте кривые зависимости $E_{\text{ПР}} = f(h)$ для обеих форм электродов на одной координатной плоскости.

19. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Таблица 3.2

Образец заголовка таблицы результатов

Номер эксперимента	Измеряемые значения величин				Вычисленные значения величин	
	$U_{\text{ПР.1}}$, кВ	$U_{\text{ПР.2}}$, кВ	$U_{\text{ПР.3}}$, кВ	h , мм	$U_{\text{ср}}$, кВ	$E_{\text{ПР}}$, кВ/мм

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие комментарии к ходу работы.
3. Описание наблюдаемых явлений в процессе экспериментов.
4. Таблицы с данными измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей $E_{\text{ПР}} = f(h)$.
6. Выводы по результатам измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. При каких формах электродов появляется резко неоднородное электрическое поле?
2. Что такое стример в газовом промежутке?

3. Как влияет форма электродов на развитие разряда в воздушном промежутке?

4. Как влияет полярность электродов на величину пробивного напряжения в резко неоднородном электрическом поле?

5. Почему при развитии разряда образовывается облако положительных ионов?

6. Какая форма электродов и при какой полярности способствует увеличению пробивного напряжения?

7. Что такое коронный разряд?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: получить навыки испытания различных твердых диэлектриков на электрическую прочность.

Краткие теоретические сведения

При повышении напряжения, прикладываемого к твердой изоляции, может произойти ее электрический пробой. Наибольшее значение напряжения, которое было приложено к изоляции в момент пробоя, называется **пробивным напряжением**.

Электрическая прочность твердых диэлектриков определяется, как правило, в постоянном электрическом поле и рассчитывается по выражению

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{h}, \text{ кВ/мм}, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – пробивное напряжение, кВ; h – толщина диэлектрика, находящегося между электродами, мм.

Бывает два вида пробоя твердой изоляции: объемный и поверхностный.

При **объемном пробое** в области пробоя через толщу диэлектрика протекает ток $I_{\text{ПР}}$, который приводит к резкому росту диэлектрических потерь, рассеивающихся в виде тепла, и дальнейшему оплавлению, обгоранию, растрескиванию в этом диэлектрике (рис. 4.1, а).

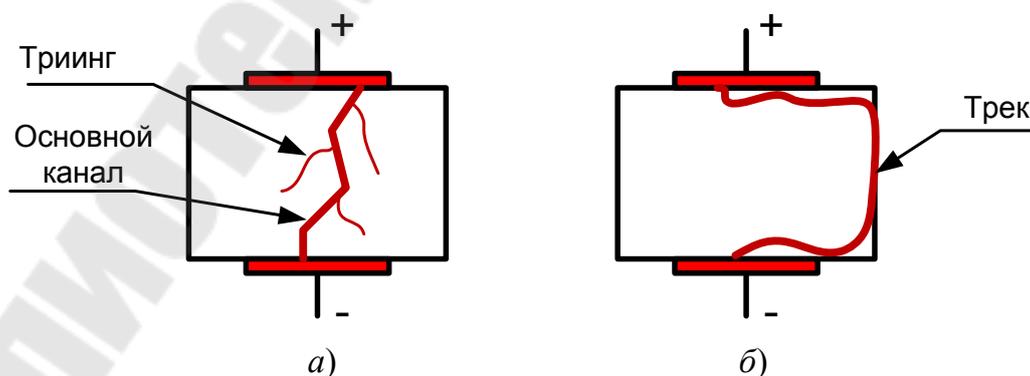


Рис. 4.1. Пробой твердого диэлектрика:
а – объемный пробой; б – поверхностный пробой

Диэлектрические потери рассчитываются по формуле

$$P_d = U_{\text{ПР}} \cdot I_{\text{ПР}}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – пробивное напряжение, В; $I_{\text{ПР}}$ – ток в момент пробоя, А.

После пробоя в толще диэлектрика образуется основной канал с разрушенным материалом и его ответвления – *триинги*.

При повторном приложении напряжения к уже пробитому диэлектрику повторный пробой происходит при более низком напряжении, так как разрушенная область заполняется газом или жидкостью.

Таким образом, объемный пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и других объектов означает аварию, выводящую данное устройство из строя.

В случае *поверхностного пробоя* токи утечки возникают в приповерхностной области диэлектрика и вызывают разрушения на его поверхности в виде характерных следов – **треков**. Значение пробивного напряжения в этом случае зависит от степени загрязнения и увлажнения поверхности диэлектрика.

Поверхностный пробой не всегда выводит изоляцию из строя. После очистки области пробоя эксплуатация такой изоляции может быть продолжена.

По характеру развития пробой твердого диэлектрика может быть электронным, электротепловым, электромеханическим и электрохимическим.

Электронный пробой обусловлен электронной поляризацией диэлектрика и отрывом электронов от атомов под действием высокой напряженности электрического поля. Он развивается быстрее, чем за одну микросекунду.

Электротепловой пробой связан с нагревом диэлектрика в работающей электроустановке и, соответственно, увеличением энергии электронов его атомов. Под воздействием высокого напряжения и тепловых колебаний электроны начинают отрываться от атомов, создавая далее электронный пробой диэлектрика. Пробивное напряжение нагретого диэлектрика будет ниже, чем у такого же холодного диэлектрика.

Электромеханический пробой обусловлен постепенным механическим разрушением твердого диэлектрика под воздействием внешних механических вибраций, ударов и т. д. Разрушенные области заполняются газом или жидкостью, то есть имеют пониженную электрическую прочность. С течением времени при некотором критиче-

ском объеме таких областей под действием высокого напряжения возникает электронный пробой диэлектрика.

Электрохимический пробой – вид медленно развивающегося пробоя, связанного с химическими изменениями твердых диэлектриков в электрическом поле, приводящими к снижению электрической прочности этих диэлектриков.

Описание лабораторной установки

Аппарат АИД-70М

Для определения электрической прочности воздушного промежутка в лабораторной работе используется аппарат испытания диэлектриков АИД-70М (рис. 4.2).

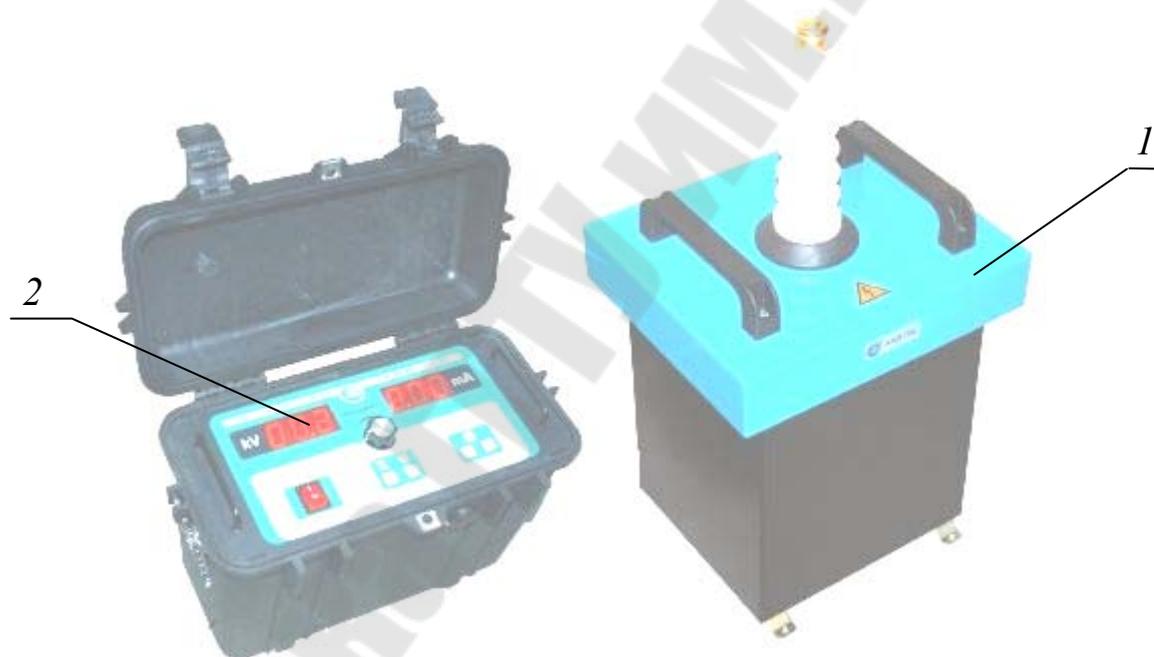


Рис. 4.2. Общий вид аппарата испытания диэлектриков

Аппарат состоит из высоковольтного генератора *1* и пульта управления *2*.

Высоковольтный генератор позволяет получать напряжения с действующим значением до 50 кВ на переменном напряжении и напряжения с амплитудным значением до 70 кВ – на постоянном напряжении.

Корпус генератора заполнен трансформаторным маслом, являющимся электроизолятором и теплоносителем. На корпусе имеется клемма для подключения защитного заземления.

Пульт управления выполнен в пластиковом корпусе. На панели лицевой пульта управления аппарата (рис. 4.3) размещены: цифровые индикаторы «kV» и «mA», сетевой выключатель, кнопки управления с надписями о функциональном назначении, ручка регулирования высокого напряжения.

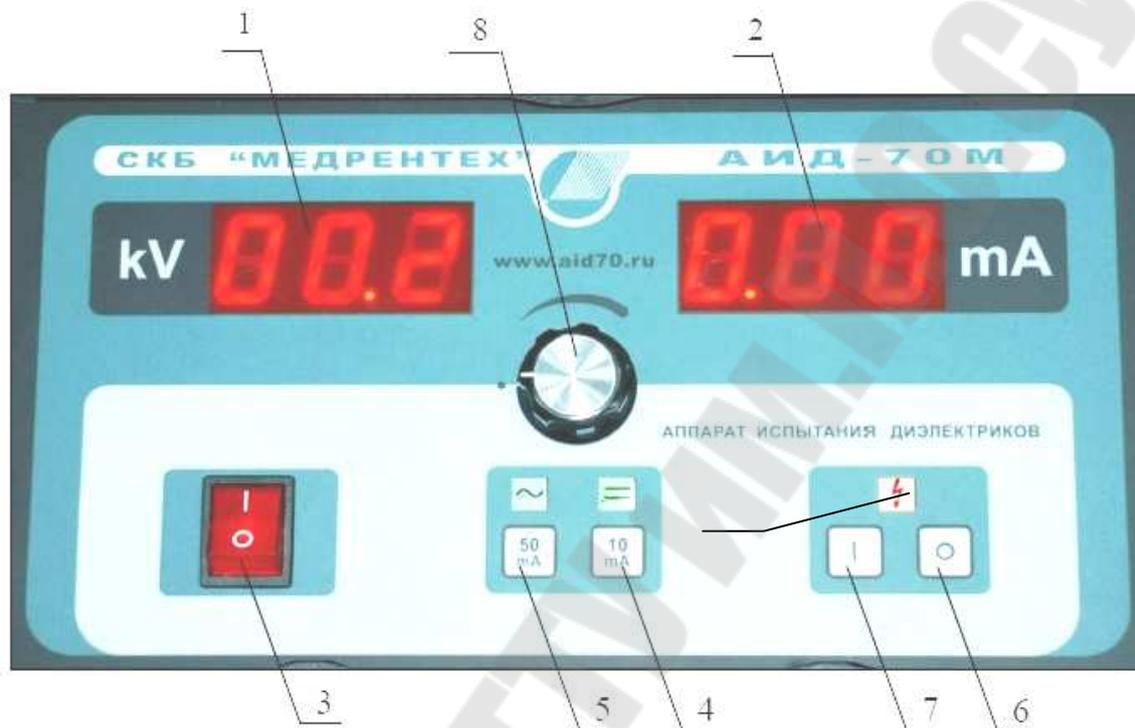


Рис. 4.3. Лицевая панель пульта управления аппарата:

- 1 – цифровой индикатор выходного напряжения (kV); 2 – цифровой индикатор выходного тока (mA); 3 – сетевой выключатель;
- 4 – кнопка включения работы аппарата в режиме постоянного тока и предела измерения 10 mA; 5 – кнопка включения работы аппарата в режиме переменного тока и предела измерения 50 mA;
- 6 – кнопка отключения высокого напряжения; 7 – кнопка включения высокого напряжения; 8 – ручка регулятора высокого напряжения; 9 – сигнальный индикатор включения высокого напряжения

На индикаторе «kV» отображается напряжение, прикладываемое к диэлектрику на стороне высокого напряжения, kV, а на индикаторе «mA» – отображается ток, протекающий через диэлектрик на стороне высокого напряжения, mA.

Внутри корпуса пульта управления установлен автотрансформатор, подсоединенный через привод к ручке регулирования высокого напряжения 8 на лицевой панели.

Программное обеспечение прибора осуществляет управление высоковольтным генератором, отображение измеренных величин, а также защиту от перегрузки. Если ток, протекающий через диэлектрик в постоянном поле, превышает 10 мА, то срабатывает защита и отключает напряжение на генераторе.

Выбор вида выдаваемого напряжения (переменное или постоянное) осуществляется кнопками 4 и 5.

Высокое напряжение на выходе генератора появляется в момент нажатия на кнопку 7 при нахождении ручки 8 в положении «минимум». При этом подается звуковой сигнал и начинает светиться индикатор 9. Для отключения высокого напряжения необходимо нажать на кнопку 6.

Оборудование за оградительной сеткой

За оградительной сеткой расположены высоковольтный генератор аппарата АИД-70М и подпружиненные электроды, между которыми необходимо размещать испытуемый образец (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Электроды испытательной установки

Площадь образца должна как минимум вдвое превышать площадь электродов. Края образца и вертикальное расположение электродов нужно тщательно выравнивать перед проведением испытаний.

Внимание! Для того чтобы поднять верхний электрод, необходимо приложить к нему достаточное усилие. Поэтому размещения образца между электродами должны выполнять два человека.

Меры по технике безопасности

1. Включение лабораторного стенда разрешается только с разрешения преподавателя.
2. Перед тем как зайти за ограждение, необходимо выполнить следующие технические мероприятия, обеспечивающие безопасность проведения работ.
 - 2.1. Вывести на нуль регулятор напряжения на пульте управления.
 - 2.2. Убедиться, что сигнальный индикатор включения высокого напряжения не светится. В противном случае отключить высокое напряжение.
 - 2.3. Отключить питание пульта управления тумблером.
 - 2.4. Создать видимый разрыв между пультом управления и источником питания (вынуть шнур питания из розетки).
 - 2.5. Открыть дверь ограждения и убедиться, что сигнальная лампа, находящаяся над ней, погасла.
 - 2.6. С помощью изолированной штанги наложить заземление на высоковольтные выводы установки в течение 1–2 с для снятия остаточного статического заряда.
3. Закрывание двери ограждения можно производить только в случае отсутствия людей за ограждением.
4. Убедиться, что после закрытия двери начала светиться сигнальная лампа, находящаяся над ней.

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.
2. Изучить меры по технике безопасности.
3. Ознакомиться с ходом работы.
4. Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

Испытание изоляционных материалов

1. Получите у преподавателя образцы материалов, запишите их названия и измерьте их толщину с помощью микрометра или штангенциркуля. Занесите результаты в табл. 4.1.

2. При выключенной установке, выполнив все мероприятия по технике безопасности, зафиксируйте между электродами испытуемый диэлектрик. Образцы испытуемых материалов поместите в горизонтальной плоскости между двумя электродами, причем размеры образцов должны быть больше диаметра электродов, чтобы избежать поверхностного разряда.

3. Выйдите из высоковольтной ячейки и закройте двери ограждения.

4. Включите питание аппарата АИД-70М. Дождитесь окончания процесса загрузки прибора.

5. Установите **постоянное** напряжение испытаний.

6. Включите подачу высокого напряжения. Убедитесь, что индикатор высокого напряжения начал светиться.

7. При минимальных значениях подаваемого напряжения значение тока через диэлектрик должно быть близким к нулю. Наличие тока более 0,1 мА свидетельствует, что образец уже пробит.

8. Медленно повышайте регулятором напряжение (не быстрее 2 кВ в секунду) и наблюдайте за показаниями индикаторов напряжения и тока. Зафиксируйте момент, когда ток через диэлектрик увеличится скачком (будет выше 0,2 мА), а напряжение несколько снизится из-за возросшей нагрузки. Записать нужно последнее максимальное значение напряжения перед пробоем диэлектрика, а также значение тока сразу после пробоя диэлектрика. Объемный пробой диэлектрика, как правило, не сопровождается какими-либо видимыми эффектами. Если же в процессе испытаний будут наблюдаться видимые разряды, то необходимо сделать выводы о наличии поверхностного пробоя.

Внимание! Если в момент пробоя диэлектрика защита автоматически не отключает прибор, то немедленно снижайте напряжение регулятором до нуля!

9. Занесите измеренные значения в табл. 4.1.

10. Выполняя меры по технике безопасности, выполните измерения для всех заданных образцов диэлектриков.

Исследование электрической прочности писчей бумаги

11. Выполните 6 измерений напряжения пробоя разного количество слоев писчей бумаги (от 3 до 20), предварительно измерив их толщину. Результаты занесите в табл. 4.1.

Расчеты

12. Рассчитайте электрическую прочность и диэлектрические потери при пробое для всех образцов диэлектриков по формулам (4.1) и (4.2). Результаты занесите в табл. 4.1.

13. Сделайте выводы по полученным результатам.

14. Для писчей бумаги постройте график зависимости электрической прочности от общей толщины ее слоев. Сделайте выводы по характеру полученной зависимости.

Таблица 4.1

Образец заголовка таблицы результатов

Название материала	h , мм	Вид пробоя	$U_{\text{ПР}}$, кВ	$I_{\text{ПР}}$, мА	$E_{\text{ПР}}$, кВ/мм	$P_{\text{д}}$, Вт

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие комментарии к ходу работы.
3. Описание наблюдаемых явлений в процессе экспериментов.
4. Таблицы с данными измерений и вычислений.
5. График зависимости $E_{\text{ПР}} = f(h)$.
6. Выводы по результатам измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Что называется пробоем диэлектрика?
2. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
3. Что такое объемный пробой твердого диэлектрика?
4. Что такое поверхностный пробой твердого диэлектрика?
5. Объясните физическую сущность электронного пробоя твердого диэлектрика.
6. Объясните физическую сущность электротеплового пробоя твердого диэлектрика.

7. Объясните физическую сущность электромеханического пробоя твердого диэлектрика.

8. Объясните физическую сущность электрохимического пробоя твердого диэлектрика.

9. Объясните принцип действия установки для определения электрической прочности твердых диэлектриков.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Цель работы: освоить методику испытаний трансформаторного масла на электрическую прочность с помощью электронной установки УИМ-90.

Краткие теоретические сведения

Трансформаторное масло – наиболее распространенный жидкий диэлектрик, применяющийся в высоковольтном оборудовании. Масло служит в качестве изоляции в силовых трансформаторах, кабелях, высоковольтных выключателях. Кроме того, трансформаторное масло выполняет функцию охладителя, отводя тепло от обмоток электрических машин в окружающую среду. В выключателях масло используется в качестве дугогасящего изолятора: выделяющиеся в процессе разрыва электрической дуги газы способствуют охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению.

При возникновении в масле достаточно мощных разрядов происходит разложение углеводородов с образованием горючих газов: водорода, метана и других газов и образование твердых частиц – **шлама**.

Изоляционные характеристики масел должны соответствовать *нормам электрической прочности*, приведенным в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Нормы электрической прочности трансформаторных масел

Для аппаратов с рабочим напряжением	Электрическая прочность, не менее, кВ/мм
До 15 кВ включительно	8
От 15 до 35 кВ включительно	10
От 60 до 220 кВ включительно	14
От 330 до 500 кВ	18
750 кВ	22

Для продления срока службы изоляционных масел используют **герметизацию оборудования** – защиту масла от непосредственного контакта с кислородом воздуха.

Значительное влияние на электрическую прочность масла оказывает вода, содержащаяся в нем. Существует три основные фазы воды в масле: отстой на дне сосуда, раствор (когда молекулы воды входят в состав молекул масла), и эмульсия (тонкие пленки воды в толще масла). К наибольшему снижению электрической прочности масла приводит именно вода, содержащаяся в виде эмульсии. Сажа и обрывки волокон искажают электрическое поле в масле и также приводят к снижению его электрической прочности.

Под влиянием электрического поля сферические капельки эмульсии воды поляризуются, приобретают форму эллипсоидов и, притягиваясь между собой разноименными концами, создают между электродами цепочки с повышенной проводимостью, по которым и происходит электрический пробой.

Трансформаторное масло, как и все жидкие диэлектрики, имеет более высокую электрическую прочность, чем газы.

Испытания масла на электрическую прочность производят между двумя погруженными в него дисковыми электродами диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними 2,5 мм. Расстояние между электродами проверяется при помощи прилагаемого к измерительной установке шаблон-калибра.

За пробу принимают объем жидкого электроизоляционного материала, одновременно отобраный в один сосуд из емкости для хранения, из аппарата и т. д. Порцией жидкого материала считают часть пробы, которую заливают в измерительную ячейку.

Перед испытанием плотно закрытый сосуд с пробой жидкости должен быть выдержан в помещении, в котором будут проводиться испытания, до приобретения жидкостью температуры помещения, но не менее 30 мин. При этом сосуд с жидкостью должен быть защищен от воздействия дневного света.

При наличии в жидкости пузырьков воздуха их следует удалить осторожным перемешиванием жидкости стеклянной палочкой. Через 10 мин после заполнения ячейки на образец подают электрическое напряжение и фиксируют значение пробивного напряжения.

При одном заполнении ячейки жидким электроизоляционным материалом осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между каждым из них, равными 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешивают для удаления продуктов разложения из межэ-

лектродного пространства, не допуская при этом образования воздушных пузырьков.

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{\text{ПР}}$ вычисляют по формуле

$$\bar{U}_{\text{ПР}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{\text{ПР}})_i, \quad (5.1)$$

где $(U_{\text{ПР}})_i$ – значение, полученное при последовательных пробоях, кВ; n – число пробоев.

Среднеквадратическую ошибку σ_u пробивного напряжения вычисляют по формуле

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((U_{\text{ПР}})_i - \bar{U}_{\text{ПР}})^2}{n \cdot (n - 1)}}. \quad (5.2)$$

Значение пробивного напряжения должно отвечать нормированному значению **коэффициента вариации** V , вычисленного по формуле

$$V = \frac{\sigma_u \cdot 100}{\bar{U}_{\text{ПР}}}. \quad (5.3)$$

Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, то в этом случае дополнительно производят еще одно заполнение испытательной ячейки порцией жидкости из того же сосуда с пробой жидкости, проводят еще шесть определений пробивного напряжения и для расчета по формулам (5.1)–(5.3) число пробоев n берут равным 12. Если и в этом случае коэффициент вариации превышает 20 %, качество диэлектрика следует считать неудовлетворительным.

Электрическая прочность трансформаторного масла рассчитывается по формуле

$$E_{\text{пр}} = \frac{\bar{U}_{\text{пр}}}{h}, \text{ кВ/мм}, \quad (5.4)$$

где h – расстояние между электродами.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из аппарата УИМ-90м с расположенной внутри него измерительной ячейкой, заполненной трансформаторным маслом (рис. 5.1). Рядом с установкой должны нахо-

даться диэлектрические палочки (или пластинки) для перемешивания масла и очистки электродов, а также шаблон-калибр для контроля расстояния между электродами.



Рис. 5.1. Лабораторная установка

Измерительная ячейка размещается в испытательном отсеке аппарата УИМ-90м. Испытательный отсек закрывается прозрачной крышкой, снабженной блокировкой. При открытой крышке включение высокого напряжения блокируется.

Справа от испытательного отсека расположена панель управления установкой, содержащая элементы управления и индикации.

С задней стороны установки расположен тумблер включения питания.

Функциональная схема установки приведена на рис. 5.2.

Схема состоит из электронного блока управления, блока индикации, регулирующего автотрансформатора TR1, электродвигателя М1, высоковольтного маслонаполненного повышающего трансформатора TR2 и концевых выключателей SA1 и SA2.

В процессе испытаний блок управления подает напряжение на электродвигатель М1, ротор которого механически связан с подвижным регулятором автотрансформатора TR1. В результате напряжение на выходе автотрансформатора автоматически возрастает. Максимальное его значение составляет 220 В.

Напряжение с выхода автотрансформатора измеряется электронной схемой блока управления, выдается на первичную обмотку повышающего трансформатора и с учетом коэффициента трансформации повышающего трансформатора отображается на дисплее установки. Максимальное значение напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора составляет 80 кВ. Это напряжение

выводится через специальные изоляторы, которые служат одновременно опорой для установки на них измерительной ячейки.

На панели управления установки расположены: цифровой индикатор выходного испытательного напряжения (единицы измерения – кВ), светодиодные индикаторы режима работы и кнопки управления. Назначение светодиодных индикаторов приведено в табл. 5.2, а назначение кнопок управления представлено в табл. 5.3.

Таблица 5.2

Назначение светодиодных индикаторов

Обозначение индикатора	Описание индикатора
Готов	<i>Постоянное свечение:</i> крышка закрыта, регулятор напряжения в исходном положении. Разрешено включение режима испытаний
	<i>Мерцание:</i> крышка открыта или регулятор не в исходном положении. Заблокировано включение режима испытаний
Авто	<i>Постоянное свечение:</i> включен режим автоматического возврата регулятора в исходное положение после завершения испытания
Испытание	<i>Постоянное свечение:</i> включен режим испытания, регулятор повышает испытательное напряжение

Таблица 5.3

Назначение кнопок управления

Обозначение кнопки	Назначение кнопки
0 ←	Обнуление дисплея. Обязательно нажимать перед включением режима испытаний
Таймер	Включение/выключение режима таймера. В этом режиме на дисплее отображается обратный отсчет времени в минутах. По окончании 5 мин выдается звуковой сигнал. При включенном режиме таймера режим испытаний не запускается
	Включение/выключение режима испытаний. В этом режиме происходит автоматическое повышение испытательного напряжения, а на дисплее отображается его текущее значение в киловольтах. В момент пробоя значение измеренного напряжения фиксируется и отображается на дисплее при его мигающем свечении. При достижении значения испытательного напряжения 80 кВ испытание будет автоматически прервано
	Приостановка автоматического повышения напряжения

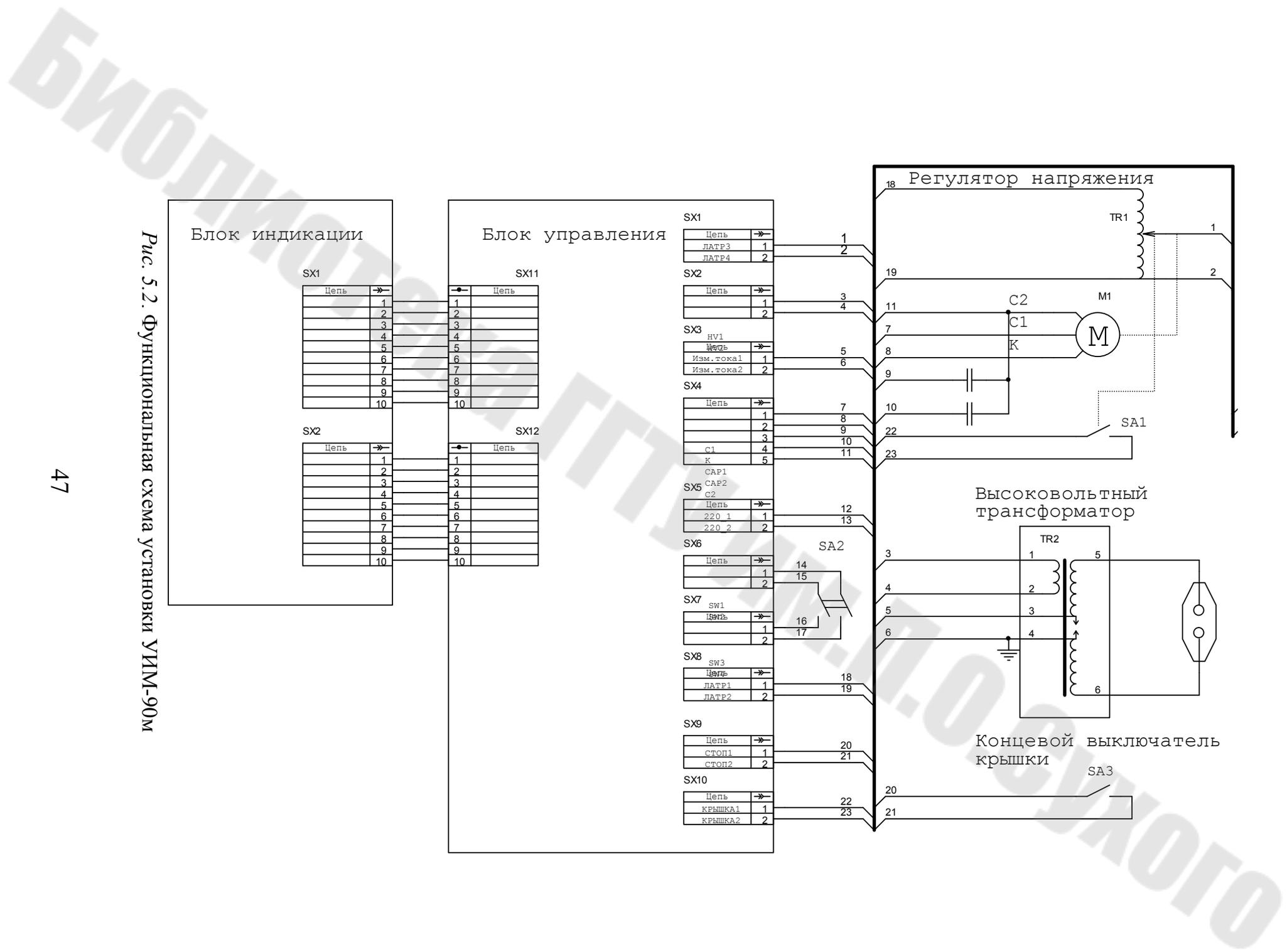
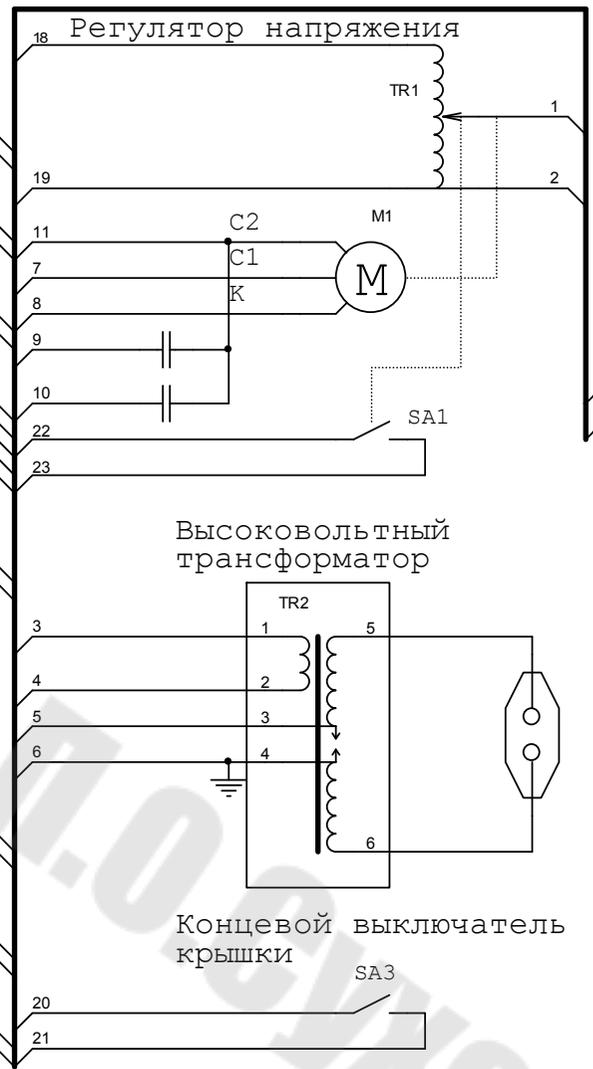
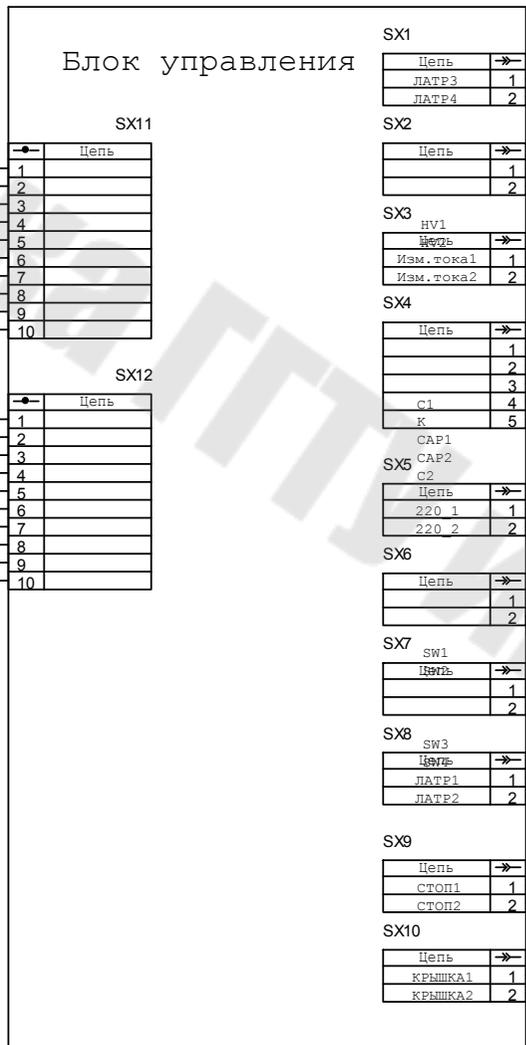
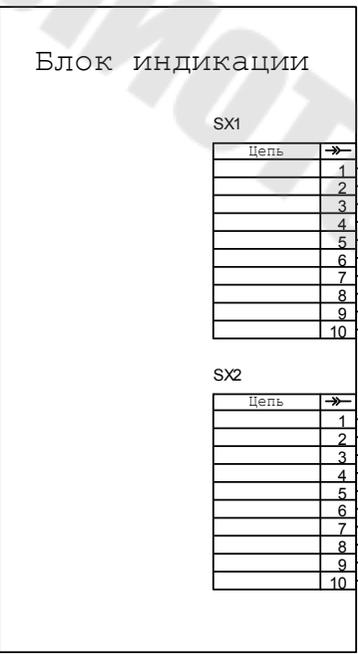


Рис. 5.2. Функциональная схема установки УИМ-90М



Меры по технике безопасности

1. Установка должна включаться только в сетевую розетку, имеющую вывод заземления.
 2. Перед включением необходимо убедиться, что тумблер сетевого питания находится в отключенном положении.
 3. Открывать испытательный отсек можно только после выключения тумблера сетевого питания установки и отсоединения вилки из розетки.
 4. Работать с установкой необходимо, стоя на резиновом коврике.
 5. Работать с неисправной установкой запрещается.
 6. Передвигать установку без разрешения преподавателя запрещается.
 7. Производить записи на рабочем столе или размещать что-либо на нем запрещается во избежание разлива масла в установке.
 8. При обнаружении разлива масла произвести очистку испытательного отсека с помощью мягкой бумаги.
 9. Во избежание разлива масла после завершения работ измерительную ячейку необходимо снять с опорных изоляторов и поставить на дно испытательного отсека.
- Запрещается:** подключать установку к розетке сети питания 220 В с отсутствующим, либо неисправным заземляющим контактом, так как заземление прибора осуществляется через заземляющий контакт вилки сетевого шнура!

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомьтесь с краткими теоретическими сведениями.
2. Внимательно изучите описание лабораторной установки.
3. Выучите меры по технике безопасности.
4. Ознакомьтесь с ходом работы и приготовьте таблицу для измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

1. Выполнив меры по технике безопасности, откройте испытательный отсек установки и с помощью диэлектрической пластинки слегка протрите электроды измерительной ячейки, чтобы избавиться от образовавшегося на них налета. При этом старайтесь сильно не взбалтывать масло во избежание подъема шлама со дна ячейки.

2. С помощью шаблон-калибра проверьте расстояние между электродами. Если расстояние не равно 2,5 мм, то обратитесь к преподавателю.

3. Аккуратно установите измерительную ячейку на опорные изоляторы.

4. Убедитесь в наличии достаточного количества трансформаторного масла в измерительной ячейке установки. Масло должно полностью покрывать электроды ячейки. В противном случае масло необходимо долить.

5. Убедитесь, что тумблер сетевого питания установки находится в отключенном положении.

6. Включите установку в сеть и тумблером питания, и по показаниям дисплея и сигнальных светодиодов убедитесь, что она готова к работе. При отсутствии готовности в течение нескольких минут отключите установку и позвоните преподавателя.

7. Проведите шесть пробоев масла через каждые 5 мин, используя для отсчета времени режим таймера установки. После каждого пробоя отключите тумблер сетевого питания и шнур сетевого питания установки и при помощи чистой диэлектрической палочки или пластинки осторожно удалите твердые продукты разложения с поверхности электродов, стараясь не взбалтывать масло. При этом избегайте возникновения пузырьков воздуха в масле.

8. Снимите на видео с помощью сотового телефона электрическую дугу в масле. Рассмотрите ее в покадровом режиме и дайте подробное словесное описание в черновике и в отчете.

Внимание! Класть смартфон на крышку установки запрещено!

9. Отключите установку с помощью тумблера и из сети.

10. Аккуратно снимите измерительную ячейку с опорных электродов и поставьте ее на дно испытательного отсека. Закройте отсек.

11. Сделайте расчеты по формулам (5.1)–(5.4).

12. По результатам расчетов сделайте выводы о пригодности трансформаторного масла к эксплуатации.

13. Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, то сделайте выводы о низкой точности выполненных измерений.

Содержание отчета

1. Упрощенная схема установки (упростите схему на рис. 5.1 самостоятельно или с помощью преподавателя).
2. Описание порядка испытаний с результатами измерений и расчетов.
3. Описание формы электрической дуги в масле.
4. Выводы по результатам всех измерений и расчетов о пригодности масла к эксплуатации для каждого класса напряжения электроустановки в отдельности.

Контрольные вопросы

1. Как получают трансформаторное масло?
2. Для чего используется трансформаторное масло?
3. От чего зависит электрическая прочность трансформаторного масла?
4. Как готовят пробу трансформаторного масла для испытаний на пробой?
5. Как работает установка УИМ-90?
6. Какие расчеты проводят при испытаниях трансформаторного масла на пробой?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: исследовать особенности работы и основные характеристики диэлектрических, проводниковых и полупроводниковых материалов в условиях изменяющейся температуры.

Краткие теоретические сведения

Температура – это характеристика степени подвижности молекул материала. Если материал нагревается, то в силу увеличения подвижности его молекул меняются и его характеристики, что, в свою очередь, влияет на работу устройства, в состав которого входит данный материал.

Для электротехники важны значения как непосредственно тепловых характеристик материалов, так и зависимость электрических характеристик материалов от температуры.

В области температур от -50 до $+50$ °С **удельное сопротивление** проводника в первом приближении пропорционально температуре и определяется по формуле:

$$\rho(\theta) = \rho_0(1 + \alpha \cdot \theta), \quad (6.1)$$

где θ – температура, °С; α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС), $1/^\circ\text{C}$; ρ_0 – удельное сопротивление при $\theta = 0$ °С.

Эта зависимость приведена на рис. 6.1.

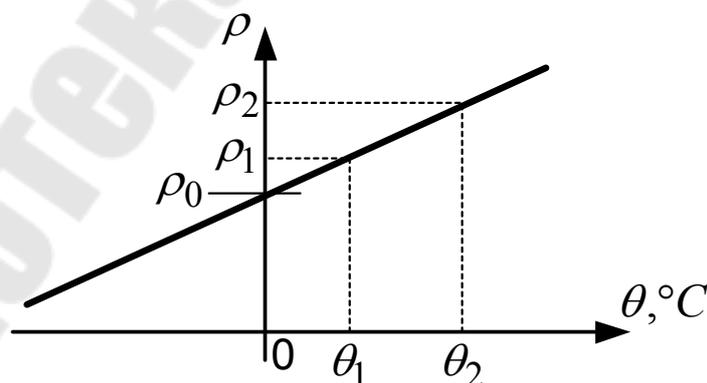


Рис. 6.1. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

Значения α и ρ_0 можно определить при двух значениях температуры θ_1 и θ_2 , как показано на рис. 6.1, составив систему уравнений на основе формулы (6.1):

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_1); \\ \rho_2 = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_2). \end{cases} \quad (6.2)$$

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле

$$R_{\text{ЭЛ}} = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (6.3)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·м; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника.

В отличие от проводников у большинства полупроводников сопротивление снижается при увеличении температуры. Причем эта зависимость нелинейна, близка к экспоненциальной зависимости и может быть записана в виде:

$$R(\theta) = A \cdot e^{-B \cdot \theta}, \quad (6.4)$$

где A и B – некоторые коэффициенты.

Эта зависимость приведена на рис. 6.2.

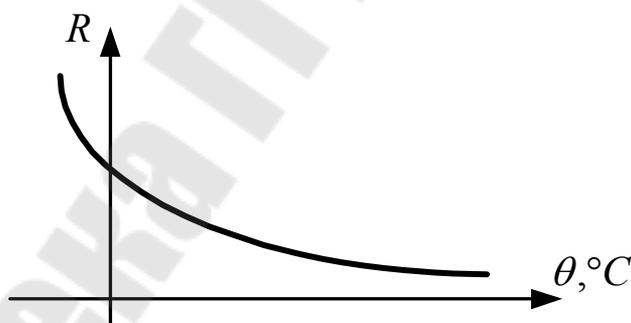


Рис. 6.2. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры

Тепловые процессы в объектах энергетики протекают в зависимости от значений тепловых сопротивлений и теплоемкостей материалов, входящих в состав этих объектов.

Тепловое сопротивление R_T характеризует способность материала проводить через себя тепло. Чем выше значение теплового сопротивления, тем хуже материал проводит тепло. Различают тепловое сопротивление непосредственно материала и тепловое сопротивление

«материал – окружающая среда». Размерность теплового сопротивления: °С/Вт или К/Вт.

Теплоемкость C_T характеризует способность материала накапливать тепло. Чем выше значение теплоемкости, тем медленнее происходит нагрев и охлаждение материала. Размерность теплоемкости: $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{С}} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Упрощенно тепловые процессы любого объекта энергетики можно описать неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$C_T \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\theta(t) - \theta_{\text{окр}}(t)}{R_T} = P(t), \quad (6.5)$$

где t – время; P – потери активной мощности в объекте; θ – температура наиболее нагретой точки объекта; $\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; R_T – суммарное тепловое сопротивление объекта; C_T – суммарная теплоемкость объекта.

При скачкообразном изменении значения потерь P решением дифференциального уравнения (6.5) будет экспоненциальная зависимость температуры объекта $\theta(t)$. Различают процессы нагрева и охлаждения объекта (рис. 6.3).

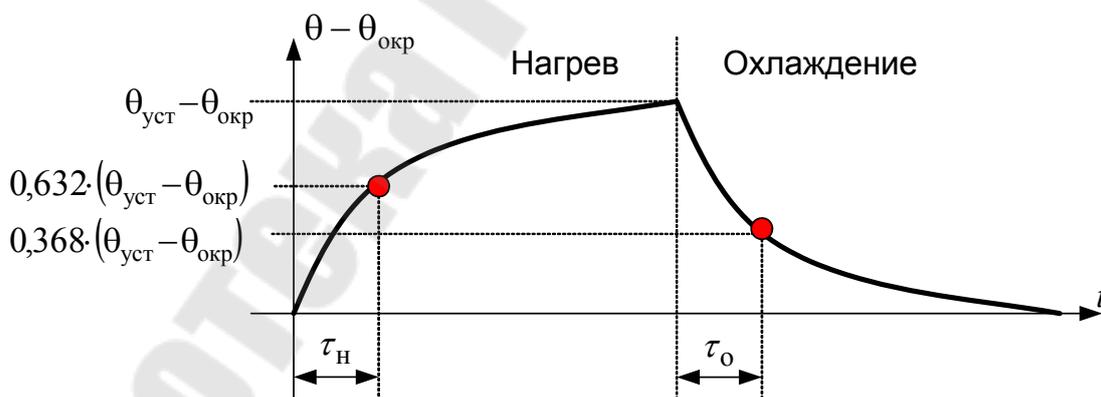


Рис. 6.3. Графическое определение тепловых постоянных времени нагрева и охлаждения

Величина, равная $\tau = R_T \cdot C_T$, называется тепловой постоянной времени.

Тепловая постоянная времени – это время, за которое температура $\theta(t)$ изменится на 63,2 % по отношению к установившемуся

значению этой температуры $\theta_{уст}$ после скачкообразного изменения потерь активной мощности P при постоянной температуре окружающей среды $\theta_{окр}$. Различают тепловые постоянные времени нагрева τ_n и охлаждения τ_o . Порядок графического определения тепловых постоянных времени показан на рис. 6.3.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из лабораторного стенда и лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), как показано на рис. 6.4.



Рис. 6.4. Лабораторная установка

- На лицевой панели лабораторного стенда расположены:
- автоматический выключатель питания стенда $QF1$;
 - тумблер подачи тока в кабель $SA1$;
 - термометр для измерения температуры воздуха;
 - амперметр для измерения тока в кабеле $PA1$;
 - микроамперметр для измерения падения напряжения на кабеле $PA2$;
 - микроамперметр для измерения сопротивления полупроводникового датчика температуры $PA3$;
 - таблица масштабных коэффициентов, на которые необходимо умножать показания приборов.

Исследуемый двухжильный кабель расположен на верхней и правой боковой стенках лабораторного стенда. Конструкция кабеля показана на рис. 6.5.

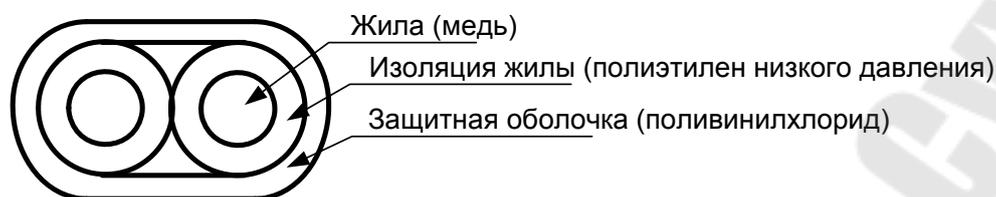


Рис. 6.5. Конструкция исследуемого кабеля

В лабораторном стенде предусмотрена возможность пропуска тока в несколько десятков ампер через жилы исследуемого кабеля для его нагрева.

Со стороны лицевой панели стенда в кабель врезан полупроводниковый датчик температуры, прилегающий вплотную к одной из его жил. Этот датчик работает по принципу термометра сопротивления, т. е. вначале необходимо измерить его электрическое сопротивление, а затем перевести это значение в температуру в соответствии с формулой (6.4).

Для того чтобы получить значения измеряемых величин, показания приборов необходимо умножить на масштабные коэффициенты (множители), приведенные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Масштабные коэффициенты

Прибор	РА1	РА2	РА3
Назначение	Ток в кабеле	Падение напряжения на кабеле	Сопротивление датчика температуры
Начальные единицы измерения	А	мкА	мкА
Множитель	0,5	$28736 \cdot 10^{-6}$	$1814814 \cdot 10^{-6}$
Единицы измерения результата	А	В	Ом

Меры по технике безопасности

В лабораторном стенде используется высокое напряжение 220 В, что потенциально опасно для жизни. Перед включением стенда необходимо убедиться, что регулятор ЛАТРа находится в положении «Минимум», а все переключатели стенда в положении «Отключено».

При нагреве кабеля открытая часть его жил может иметь достаточно высокую температуру. Поэтому дотрагиваться до них запрещено.

В случае обнаружения неисправностей, запаха горения или повреждения проводов стенда необходимо отключить питание стенда и позвать преподавателя.

Внимание! Не применяйте существенных усилий при регулировке ЛАТРа! Не шевелите кабель, закрепленный на стенде!

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомьтесь с краткими теоретическими сведениями.
2. Внимательно изучите описание лабораторной установки.
3. Выучите меры по технике безопасности.
4. Ознакомьтесь с ходом работы, сделайте необходимые расчеты и подготовьте таблицы для измерений.

Порядок выполнения работы

Внимание! Запрещено начинать выполнение работы без проверки знаний по технике безопасности преподавателем!

Внимание! Перед выполнением каждого пункта задания вначале внимательно прочтите его!

Регистрация процессов нагрева и охлаждения кабеля

1. Рассчитайте цену деления каждого из измерительных приборов. При измерениях учитывайте показания приборов даже между делениями.

2. Получите у преподавателя значение напряжения, которое нужно выставить на ЛАТРе (в диапазоне от 160 до 200 В).

3. Приготовьте таблицу для регистрации показаний приборов РА1, РА2 и РА3 каждые 30 с в течение 12 мин для процесса нагрева кабеля и для регистрации показаний прибора РА3 каждые 30 с в течение 12 мин для процесса охлаждения кабеля. Предусмотрите в таблице графы для записей значений температуры воздуха $\theta_{\text{окр}}$ в течение всего интервала измерения каждые 5 мин. Рекомендуется распределить между членами бригады запись показаний приборов.

4. Убедитесь, что регулятор ЛАТРа сведен на минимум.

5. Установите тумблер SA1 в положение «Отключено».

6. Приготовьте ручной секундомер.

7. Включите питание стенда.

8. Установите на ЛАТРе требуемое напряжение и приготовьтесь записывать показания.

9. Включите тумблер $SA1$, одновременно запустив секундомер, и начните измерения для процесса нагрева кабеля. Записывайте показания каждые 30 с в течение 12 мин. Значения температуры воздуха записывайте каждые 5 минут.

10. По окончании процесса нагрева обнулите секундомер и снова запустите его, одновременно установив тумблер $SA1$ в положение «Отключено» и регулятор ЛАТРа в минимальное положение. Начните измерения для процесса охлаждения кабеля. Записывайте показания каждые 30 с в течение 12 мин. Значения температуры воздуха $\theta_{\text{окр}}$ записывайте каждые 5 мин.

11. Отключите питание стенда.

Расчеты

12. Используя табл. 6.1, пересчитайте показания приборов РА1, РА2 и РА3 в требуемых величинах: ток – в кабеле I , падение напряжения – на кабеле ΔU и сопротивление – для датчика температуры R_t . Сведите результаты расчетов в табл. 6.2 для каждого значения времени t .

13. Выведите расчетное соотношение для определения температуры жилы кабеля θ на основе сопротивления полупроводникового датчика температуры R_t и коэффициентов A и B . Для этого из формулы (6.4) по правилам математики выразите температуру θ .

14. По выведенной формуле, зная измеренные значения R_t , рассчитайте экспериментальные значения температуры жилы кабеля θ для каждого значения времени t . Для полупроводникового датчика температуры коэффициенты равны: $A = 13935$ Ом; $B = 0,03349$ 1/°C. Сведите результаты расчетов в табл. 6.2.

15. Для каждого значения времени t рассчитайте превышения температуры жилы кабеля над температурой воздуха, т. е. значения $\theta - \theta_{\text{окр}}$. Результаты занесите в табл. 6.2.

16. Постройте графики процессов нагрева и охлаждения кабеля как зависимость $\theta - \theta_{\text{окр}}$ от t .

17. Определите графически постоянные времена нагрева и охлаждения кабеля в соответствии с рис. 6.3.

18. Для каждого значения времени t процесса нагрева кабеля рассчитайте электрическое сопротивление его жил по формуле

$$R_{\text{жил}} = \frac{\Delta U}{I}. \text{ Результаты занесите в табл. 6.2.}$$

19. Постройте график зависимости $R_{\text{жил}}$ от t .

20. Сделайте выводы по результатам всех измерений и расчетов.

Таблица 6.2

Образец заголовка таблицы результатов

$t, \text{с}$	$I, \text{А}$	$\Delta U, \text{В}$	$R_{\text{жил}}, \text{Ом}$	$R_t, \text{Ом}$	$\theta_{\text{окр}}, \text{°С}$	$\theta, \text{°С}$	$\theta - \theta_{\text{окр}}, \text{°С}$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты измерений в виде таблиц с краткими комментариями к ходу работы.
3. Формулы и результаты расчетов с комментариями.
4. Графики необходимых зависимостей.
5. Результаты расчетов требуемых величин на основе построенных графиков.
6. Выводы по результатам всех измерений и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Как зависит сопротивление проводника от температуры? Почему зависимость именно такова?
2. Как зависит сопротивление полупроводника от температуры? Почему зависимость именно такова?
3. Что такое тепловое сопротивление и теплоемкость материала?
4. Каким уравнением описываются тепловые процессы в объектах энергетики? Как такие уравнения решают в математике?
5. Что такое тепловая постоянная времени и как она определяется?
6. Что такое классы нагревостойкости изоляции? Приведите примеры.
7. Что такое закон Аррениуса?

Литература

1. Дробов, А. В. Электротехнические материалы : учеб. пособие / А. В. Дробов, Н. Ю. Ершова. – Минск : РИПО, 2019. – 237 с. – Режим доступа: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600091>.

2. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения : учеб. пособие / Е. Е. Привалов. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 266 с. – Режим доступа: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436753>.

3. Целебровский, Ю. В. Электротехническое и конструкционное материаловедение : учеб. пособие / Ю. В. Целебровский. – Новосибирск : НГТУ, 2019. – 64 с. – Режим доступа: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574645>.

4. Конструкционные электротехнические материалы : учеб. пособие / В. П. Горелов [и др.] ; под ред. В. П. Горелова. – 5-е изд., стер. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 341 с. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=445841>.

5. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – 7-е изд. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

Содержание

Введение.....	3
<i>Лабораторная работа № 1. Исследование токов утечки диэлектриков.....</i>	<i>4</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование электрической прочности воздуха в переменном электрическом поле</i>	<i>14</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование электрической прочности воздуха в постоянном электрическом поле.....</i>	<i>24</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование электрической прочности твердых диэлектриков.....</i>	<i>33</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Определение электрической прочности трансформаторного масла.....</i>	<i>42</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование тепловых характеристик электротехнических материалов</i>	<i>51</i>
Литература	59

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Зализный Дмитрий Иванович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Практикум

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей**

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»

**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения**

Редактор
Компьютерная верстка

Т. Н. Мисюрова
Н. Б. Козловская

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель