



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

Д. И. Зализный, Д. Р. Мороз

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2012

УДК 621.315.6.002.3(075.8)
ББК 31.23я73
3-23

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 26.06.2012 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Материаловедение в машиностроении» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *И. Н. Степанкин*

Зализный, Д. И.

3-23 Конструкционные и электротехнические материалы : лаборатор. практикум по одному курсу для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / Д. И. Зализный, Д. Р. Мороз. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 58 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: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-089-8.

Содержит семь лабораторных работ, в которых исследуются характеристики твердых, жидких и газообразных диэлектриков, а также проводниковых и полупроводниковых материалов. Особое внимание уделено вопросам техники безопасности, так как в большинстве лабораторных работ используется напряжение выше 1 кВ.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.315.6.002.3(075.8)
ББК 31.23я73

ISBN 978-985-535-089-8

© Зализный Д. И., Мороз Д. Р., 2012
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: исследовать составляющие токов утечки диэлектриков, определить объемное и поверхностное сопротивления различных образцов материалов, а также зависимость этих сопротивлений от приложенного напряжения.

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).

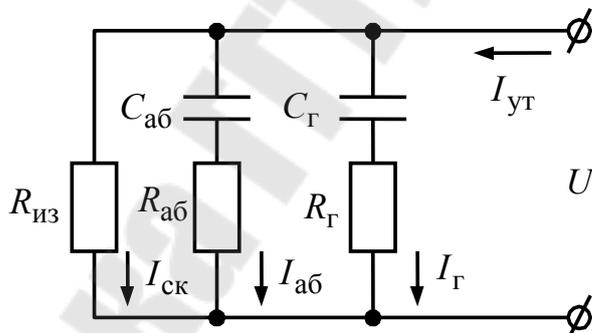


Рис. 1.1. Электрическая схема замещения диэлектрика

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:

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

где S – площадь электрода; h – толщина образца.

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:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l}, \text{ Ом}, \quad (1.3)$$

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

Переходный процесс при приложении постоянного напряжения U к диэлектрику приведен на рис. 1.2. Ток утечки достигает своего установившегося значения не более чем через 60 с после приложения напряжения.

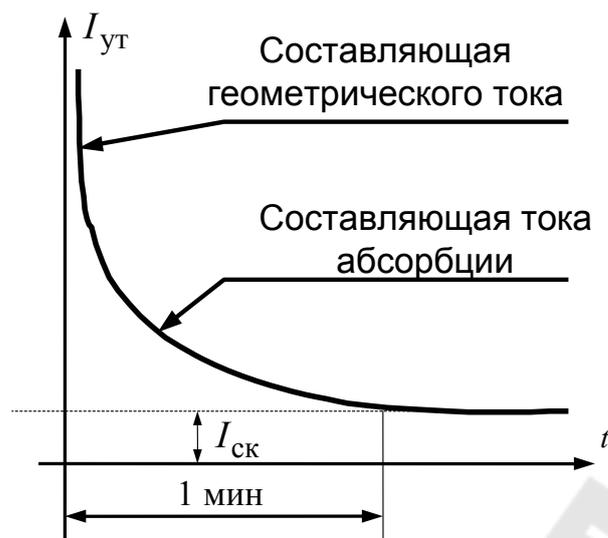


Рис. 1.2. Процесс изменения тока утечки диэлектрика при приложении напряжения

Описание лабораторной установки

Детальное описание лабораторной установки для исследования токов утечки диэлектриков приведено в Паспорте к лабораторному стенду. Лабораторная установка включает лабораторный стенд и установку для высоковольтных электродов.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.3.

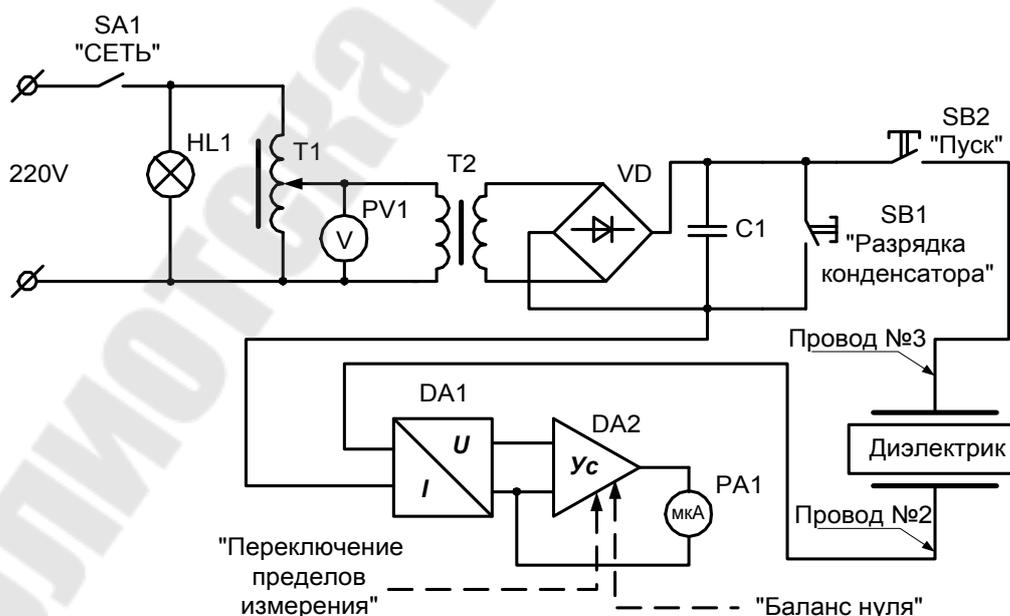


Рис. 1.3. Функциональная схема лабораторной установки

Схема работает следующим образом.

Сетевое напряжение 220 В через тумблер «Сеть» подается на регулировочный автотрансформатор (ЛАТР) Т1. При включении тумблера «Сеть» начинает светиться сигнальная лампа НЛ1. Напряжение, снимаемое с вторичной обмотки ЛАТРа, контролируется с помощью вольтметра PV1, выведенного на лицевую панель стенда. Это же напряжение подается на первичную обмотку повышающего трансформатора Т2.

На вторичной обмотке трансформатора Т2 формируется высокое напряжение, которое может достигать 1 кВ. Это напряжение выпрямляется с помощью диодного моста VD и сглаживается высоковольтным конденсатором С1. После отключения питания конденсатор С1 продолжает хранить напряжение. Поэтому для его разрядки предусмотрена кнопка SB1, которую можно нажимать только при отключенном питании.

Высоковольтное постоянное напряжение подается на исследуемый образец диэлектрика через кнопку SB2 «Пуск». В случае отпущения SB2 напряжение на диэлектрик не подается.

Исследуемый образец диэлектрика подключается последовательно с высоковольтным конденсатором и электронным преобразователем ток-напряжение DA1. На выходе DA1 формируется напряжение, пропорциональное току утечки диэлектрика. Далее это напряжение подается на вход электронного усилителя DA2. Коэффициент усиления данного усилителя можно изменять с помощью переключателя «Переключение пределов измерения», выведенного на лицевую панель стенда. К выходу усилителя подключен микроамперметр, показания которого пропорциональны току утечки диэлектрика. Статическую ошибку усилителя можно скомпенсировать с помощью регулятора «Баланс нуля», выведенного на лицевую панель стенда.

В табл. 1.1 приведены значения коэффициентов усиления электронного усилителя для каждой позиции переключателя при экспериментальных значениях тока утечки диэлектрика $I_{ут}$ и показаний микроамперметра PA1, т. е. тока $I_{вых}$.

Таблица 1.1

Коэффициенты усиления электронного усилителя

Номер позиции	$K = \frac{1}{K_{ус}}$
1	0,4386
2	0,101
3	0,03252

Номер позиции	$K = \frac{1}{K_{yc}}$
4	0,01267
5	0,005577
6	0,003011
7	0,001214
8	0,0006322
9	0,0003267

Таким образом, зная показания микроамперметра РА1 (рис. 1.3) и номер позиции переключателя пределов измерения, ток утечки диэлектрика можно рассчитать по формуле

$$I_{ут} = KI_{вых}, \text{ мкА.} \quad (1.4)$$

Коэффициент трансформации повышающего трансформатора Т2 (рис. 1.3) равен

$$K_{тр} = \frac{U_2}{U_1} = 4,7.$$

Значение напряжения, приложенного к диэлектрику, можно рассчитать по формуле

$$U_d = \sqrt{2}K_{тр} \cdot U_v = 6,63U_v, \quad (1.5)$$

где U_v – показания вольтметра PV1 (рис. 1.3).

На рис. 1.4 приведен чертеж установки с высоковольтными электродами.

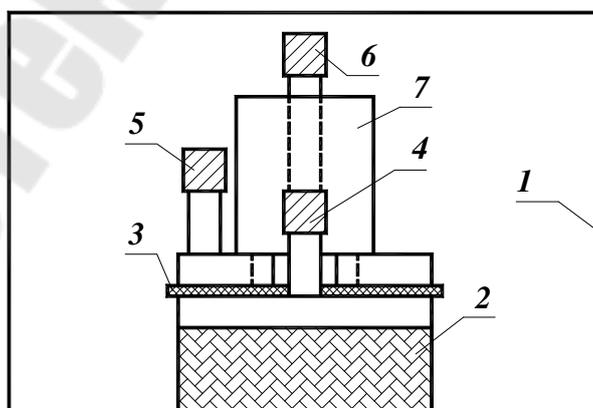


Рис. 1.4. Установка с высоковольтными электродами:

1 – защитное ограждение; 2 – подставка; 3 – исследуемый диэлектрик;
4 – нижний электрод; 5 – охранное кольцо; 6 – верхний электрод; 7 – корпус

Охранное кольцо применяется для ограничения пути протекания поверхностного тока утечки.

Методика проведения измерений

Для измерения объемного тока утечки необходимо в установке с высоковольтными электродами подключить провод № 3 к верхнему электроду, а провод № 2 – к нижнему электроду.

Для измерения поверхностного тока утечки необходимо в установке с высоковольтными электродами подключить провод № 3 к верхнему электроду, а провод № 2 – к охранному кольцу.

Порядок измерений:

1. Убедиться, что ЛАТР выведен в положение «Минимум».
2. Установить переключатель пределов измерения в положение № 1.
3. Включить питание стенда.
4. Установить ЛАТРОм требуемое напряжение, контролируя его по вольтметру.
5. Выждать не менее 60 с (процесс зарядки высоковольтного конденсатора).
6. Добиться нулевых показаний микроамперметра с помощью регулятора «Баланс нуля».
7. Нажать кнопку «Пуск», удерживать ее и зафиксировать максимальное отклонение стрелки микроамперметра. Отпустить кнопку.
8. В случае незначительных отклонений стрелки включить необходимый предел измерения, учитывая, что с переходом к следующему пределу коэффициент усиления электронного усилителя увеличивается приблизительно вдвое.
9. Добиться на данном пределе измерения нулевых показаний микроамперметра с помощью регулятора «Баланс нуля».
10. Нажать кнопку «Пуск», удерживать ее и провести необходимые измерения.
11. Изменять подаваемое напряжение только в сторону увеличения. После изменения подаваемого напряжения выждать не менее 60 с.
12. После окончания измерений вывести ЛАТР в положение «Минимум» и отключить питание стенда.
13. В обязательном порядке нажать кнопку «Разрядка конденсатора» и удерживать не менее 5 с.
14. Между предыдущим и последующим включением стенда необходимо соблюдать интервал времени не менее 60 с.

Меры по технике безопасности

В лабораторном стенде используется высокое напряжение до 1 кВ, что потенциально опасно для жизни. При работе со стендом необходимо выполнять следующие меры по технике безопасности:

1. Строго следовать инструкции по проведению измерений.
2. В случае обнаружения неисправностей или повреждения проводов отключить питание стенда и позвать преподавателя.
3. При работе с высоковольтными электродами отключить стенд не только тумблером «Сеть», но и из розетки.
4. Строго запрещается проводить измерения при открытой крышке защитного ограждения высоковольтных электродов.

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомьтесь с краткими теоретическими сведениями.
2. Внимательно изучите описание лабораторной установки, а также Паспорт к лабораторному стенду.
3. Внимательно изучите методику проведения измерений.
4. Выучите меры по технике безопасности.
5. Ознакомьтесь с ходом работы и приготовьте необходимые таблицы для измерений.

Ход работы

1. Получите у преподавателя необходимые образцы диэлектриков и измерьте их толщину h .
2. Откройте установку с высоковольтными электродами и измерьте диаметр d_1 верхнего электрода, а также диаметр отверстия в охранном кольце d_2 . Рассчитайте площадь поверхности верхнего электрода S .
3. Соберите схему для измерения объемных токов утечки.
4. При напряжении, заданном преподавателем, и в соответствии с разделом «Методика проведения измерений» проведите измерения объемных токов утечки всех образцов диэлектриков. При этом фиксируйте максимальное значение тока утечки (по максимальному отклонению стрелки микроамперметра в начальный момент времени), а также сумму максимального тока абсорбции и сквозного тока (по показаниям микроамперметра сразу после возврата стрелки после начального броска), и установившееся значение тока, равное объемному току I_v . Сведите результаты измерений в таблицу.

5. Рассчитайте объемные сопротивления диэлектриков по формуле: $R_v = \frac{U_d}{I_v}$, где напряжение U_d рассчитывается по формуле (1.5).

6. Рассчитайте удельные объемные сопротивления диэлектриков по формуле (1.2).

7. Соберите схему для измерения поверхностных токов утечки.

8. Измерьте для установившегося режима поверхностные токи утечки I_s всех образцов диэлектриков при напряжении, заданном преподавателем.

9. Рассчитайте поверхностные сопротивления диэлектриков по формуле $R_s = \frac{U_d}{I_s}$.

10. Рассчитайте удельные поверхностные сопротивления диэлектриков 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).

11. По формуле (1.1) рассчитайте сопротивления изоляции для всех диэлектриков.

Содержание отчета

1. Цель работы и краткие теоретические сведения.
2. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
3. Результаты расчетов с комментариями.
4. Выводы по результатам измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое поляризация диэлектрика? В чем физический смысл диэлектрической проницаемости?
2. Какие виды поляризации диэлектриков вы знаете?
3. Какие составляющие токов утечки диэлектриков вы знаете?
4. Почему возникает ток абсорбции, и в каких видах электрических полей он протекает?
5. Чем обусловлен сквозной ток диэлектрика? Какие составляющие сквозного тока вы знаете?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУХА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Цель работы: ознакомление с физическими процессами, протекающими при пробое воздушного промежутка в переменном электрическом поле. Получение опытной зависимости электрической прочности воздушного промежутка от расстояния между электродами.

Краткие теоретические сведения

В качестве изоляции в различных электрических установках используются газы. Особое место среди них занимает воздух. Он является естественной изоляцией многих электротехнических конструкций: трансформаторов, конденсаторов, воздушных выключателей, линий электропередачи.

Как диэлектрик воздух имеет следующие положительные свойства:
– быстро восстанавливает свою электрическую прочность после пробоя;

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

– незначительно изменяет диэлектрическую проницаемость;

– малые диэлектрические потери.

Отрицательными свойствами воздуха как диэлектрика являются:
– невозможность использования его для закрепления деталей устройств, вследствие чего они применяются в сочетании с твердыми диэлектриками;

– 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 накала с высокой электрической

проводимостью. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – электрической прочностью диэлектрика.

Электрическая прочность газового промежутка определяется по выражению:

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{h}, \text{ кВ/мм}, \quad (2.1)$$

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

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 газовых промежутков: ударная ионизация, фотоионизация, термоионизация и поверхностная ионизация. Наибольшее влияние на формирование пробоя оказывает ударная ионизация.

В любом воздушном промежутке в результате внешнего воздействия (оптического, теплового, радиационного и т. д.) всегда образуется небольшое количество свободных носителей зарядов. В результате воздействия электрического поля свободные носители заряда ускоряются, приобретая кинетическую энергию. Если носитель заряда до столкновения с нейтральной молекулой приобретет достаточное количество кинетической энергии, то в результате столкновения произойдет ионизация нейтральной молекулы и образование новых свободных носителей заряда (рис. 2.1).

Когда напряженность электрического поля достигает значения, при котором возможна ударная ионизация, то в межэлектродном пространстве возникают лавинные процессы. При этом происходит размножение заряженных частиц – электронов и ионов. Предположим, что в какой-либо точке поля возник свободный электрон, обладающий энергией, достаточной для ионизации молекулы газа. Этот электрон ионизирует молекулу, что приводит к образованию положительного иона и двух электронов. Разгоняясь в электрическом поле, каждый из этих электронов, в свою очередь, ионизирует молекулы, что приводит к лавинообразному процессу (рис. 2.1).

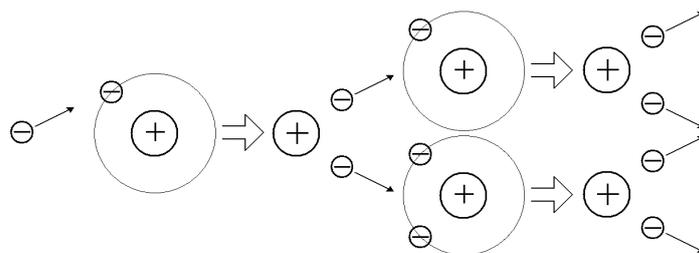


Рис. 2.1. Схема ударной ионизации и образования лавины электронов

Электроны и ионы, образовавшиеся в лавине, перемещаются под действием электрического поля. Подвижность электронов много больше подвижности ионов, поскольку их масса значительно меньше, в результате в голове лавины образуется избыток электронов, а в ее хвосте преобладают положительно заряженные ионы (рис. 2.2).

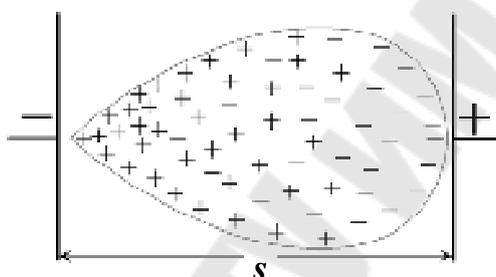


Рис. 2.2. Распределение электронов и положительных ионов в лавине

На рис. 2.3 показана зависимость напряжения пробоя газа от расстояния между электродами.

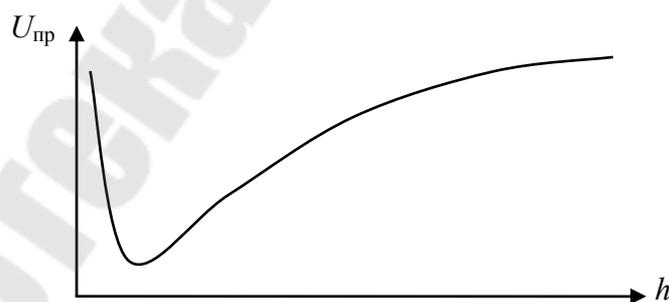


Рис. 2.3. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами

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

Описание лабораторной установки

Для определения электрической прочности воздушного промежутка в лабораторной работе используется установка переменного тока (рис. 2.4).

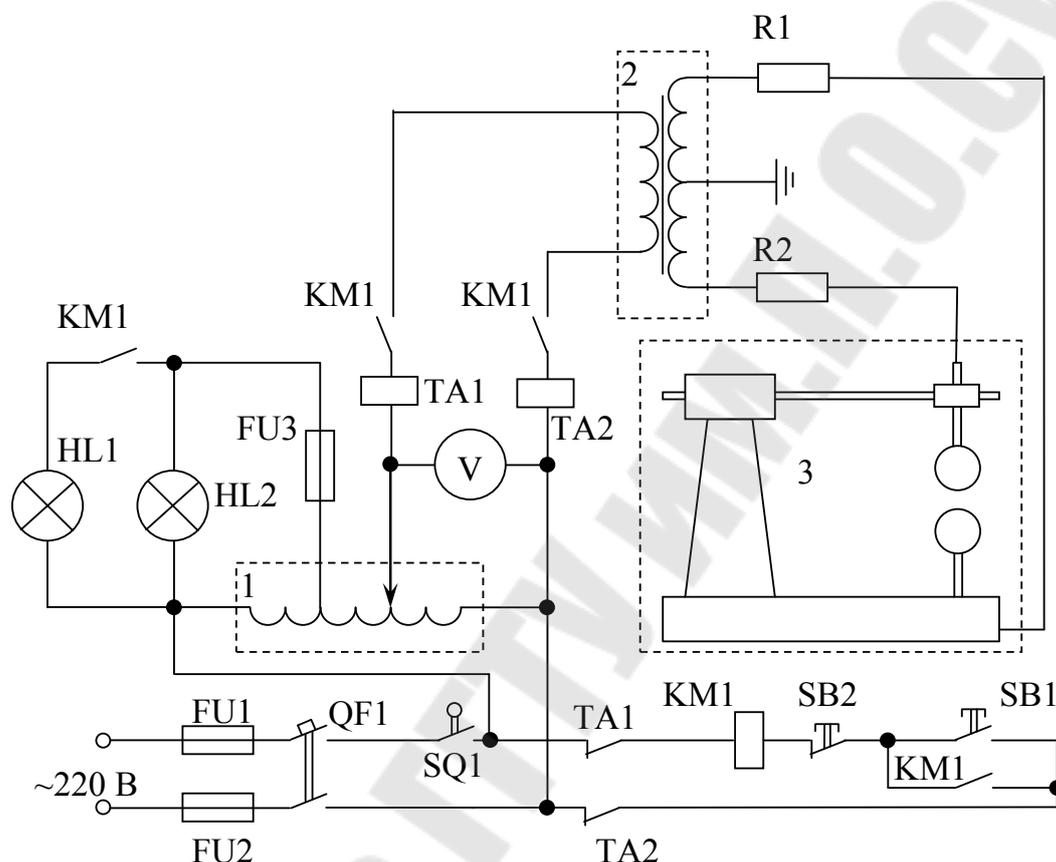


Рис. 2.4. Принципиальная схема испытательной установки переменного тока:
1 – регулировочный трансформатор; 2 – испытательный трансформатор;
3 – разрядник

Питание установки осуществляется от сети однофазного переменного напряжения 220 В через предохранители FU1, FU2 и автоматический выключатель QF1. Работа установки возможна только при закрытой двери ограждения, что обеспечивает замыкание конечного выключателя SQ1. При включении лабораторного стенда в электрическую сеть и закрытой двери ограждения, напряжение подается на регулировочный автотрансформатор 1, что приводит к зажиганию лампы HL2 зеленого цвета. Для подачи питания на испытательный трансформатор 2 необходимо вывести регулировочный трансформатор в минимальное положение и нажать кнопку SB1 «Вкл.», что приводит к срабатыванию магнитного пускателя KM1 и замыканию всех

его контактов и зажиганию лампы HL2 красного цвета. Высоковольтное напряжение с испытательного трансформатора 2 подается на разрядник 3 через буферные сопротивления R1 и R2, которые служат для защиты измерительного трансформатора от перегрузок при пробое воздушного промежутка в шаровом разряднике.

Питание первичной обмотки испытательного трансформатора осуществляется через токовые реле ТА1 и ТА2. Пробой воздушного промежутка приводит к протеканию большого тока через токовые реле и их срабатыванию. Срабатывание токовых реле вызывает размыкание контактов ТА1 и ТА2 в цепи питания магнитного пускателя, что в свою очередь отключает первичную обмотку испытательного трансформатора от сети. Прерывание питания магнитного пускателя вызывает так же нажатие кнопки SB2 «Откл.».

Напряжение пробоя рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ПР}} = K_{\text{T}} \cdot U_{\text{V}}, \quad (2.2)$$

где K_{T} – коэффициент трансформации испытательного трансформатора; U_{V} – показания вольтметра.

Коэффициент трансформации K_{T} определяют по формуле

$$K_{\text{T}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{ВН}}$ – номинальное напряжение на стороне высокого напряжения испытательного трансформатора; $U_{\text{НН}}$ – номинальное напряжение на стороне низкого напряжения испытательного трансформатора.

Величины $U_{\text{ВН}}$ и $U_{\text{НН}}$ можно найти на шильде (щитке) трансформатора.

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 и отключить установку кнопкой «Откл.».

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

2.3. С помощью изолирующей штанги наложить заземление на высоковольтные выводы установки для снятия остаточного статического заряда.

2.4. Открыть дверь, войти в ячейку и после этого можно производить операции за ограждением.

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

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться со схемой испытательной установки.
2. Изучить меры по технике безопасности.
3. Подготовить таблицу для внесения результатов измерений.
4. Определить коэффициент трансформации испытательного трансформатора по паспортным данным, расположенным на шильде трансформатора, и формуле (2.3).

Ход работы

1. При выключенной установке закрепить на разряднике электроды в соответствии с табл. 2.1. и установить соответствующее расстояние между ними.

2. Установить в минимальное положение регулировочный автотрансформатор.

3. Включить установку в сеть напряжением 220 В. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа HL2.

4. Включить установку нажатием кнопки «Вкл.» и подать напряжение на испытательный трансформатор. При этом должна загореться красная сигнальная лампа HL1.

5. С помощью регулировочного автотрансформатора изменять напряжение от нуля до пробивного значения со скоростью 1 кВ/с. В момент пробоя сработают реле максимального тока ТА1 и ТА2, что приведет к отключению установки.

6. Записать значение напряжения на первичной обмотке испытательного трансформатора U_V в табл. 2.2. Для каждого эксперимента производится три измерения пробивного напряжения.

Таблица 2.1

Расстояния между электродами в сантиметрах

Номер варианта	Тип электродов	Номер измерения					
		1	2	3	4	5	6
1	Большой шар – большой шар; Большой шар – плоскость	1,2	1,7	2,0	2,4	2,8	3,4
2	Средний шар – средний шар; Большой шар – средний шар	1,3	1,8	2,2	2,5	2,9	3,5
3	Малый шар – малый шар; Малый шар – большой шар	1,2	1,6	1,9	2,1	2,5	3,2
4	Большой шар – средний шар; Средний шар – плоскость	1,3	1,8	2,1	2,3	2,7	3,3
5	Большой шар – малый шар; Малый шар – плоскость	1,4	1,7	2,0	2,5	3,0	3,5

Таблица 2.2

Результаты измерений и расчетов

Номер эксперимента	Изменяемые величины				Вычисленные значения		
	$U_V^1, В$	$U_V^2, В$	$U_V^3, В$	$h, мм$	$U_V^{среднее}, В$	$U_{ПР}, кВ$	$E_{ПР}, кВ/мм$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Выполнить пункты 2–6 для всех заданных расстояний между электродами и форм электродов в соответствии с табл. 2.1.

На максимальном расстоянии между электродами (табл. 2.1) зарисовать форму искры. Для этого можно воспользоваться видеокamerой сотового телефона. Дать словесное описание искры и всех эффектов, сопровождавших ее появление.

Произвести необходимые вычисления по формулам (2.3)–(2.1). Занести их в таблицы. При этом $U_V^{среднее}$ – среднее арифметическое измеренных значений напряжения за три измерения.

Построить графики зависимости $E_{ПР} = f(h)$ для всех форм электродов и сделать выводы по полученным результатам.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и содержание лабораторной работы.

3. Схема испытательной установки.
4. Таблицы с данными измерений и вычислений.
5. График зависимости $E_{\text{пр}} = f(h)$.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Назовите положительные свойства воздуха как диэлектрика.
2. Назовите отрицательные свойства воздуха как диэлектрика/
3. Что называется пробоем?
4. Что называется электрической прочностью диэлектриков?
5. Как связаны между собой пробивное напряжение и электрическая прочность?
6. Объясните физическую сущность пробоя газообразных диэлектриков.
7. Какая существует зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле и почему?
8. Что такое ионизация и какие механизмы ионизации существуют?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУХА В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Цель работы: ознакомление с особенностями протекания пробоя в условиях резко-неоднородного электрического поля при различных полярностях электродов в постоянном электрическом поле.

Краткие теоретические сведения

Резко-неоднородное поле появляется в газовых промежутках с электродами в виде стержень–плоскость, провод–провод, провод–земля и т. п. В таких промежутках наибольшая напряженность поля появляется у электрода с малым радиусом кривизны (рис. 3.1). Если в этой области напряженность поля достигнет критического значения, при котором начинается ударная ионизация, то возникает особая форма разряда, называемая коронным разрядом.



Рис. 3.1. Изменение напряженности электрического поля вблизи

В зоне ионизации вначале возникает лавинная форма коронного разряда в виде светящего ореола у стержня. С увеличением напряженности поля плотность лавин настолько возрастает, что фотоны, излучаемые лавинами, приобретают энергию достаточную для осуществления фотоионизации газа в области головки лавины. Образуются новые лавины впереди породивших их начальных лавин. И так последовательно увеличивается число лавин. В итоге появляется тонкий проводящий канал, заполненный плазмой, который называется *стримером* (*лидером*) (рис. 3.2).

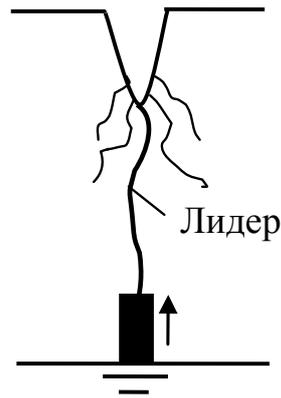


Рис. 3.2. Стримерно-лидерная фаза разряда газа в неоднородном поле

Тело лавины электронов состоит из положительных ионов, подвижность которых намного меньше электронов, так как их масса примерно на 3 порядка больше электронов. Поэтому при движении лавины образуется «облако» положительного объемного заряда, расположенного вблизи стержня (рис. 3.3). Если полярность стержня положительная, то положительный объемный заряд, суммируясь с внешним электрическим полем источника питания, увеличивает результирующую напряженность поля вблизи стержня и приближает этот максимум к противоположному электроду и, как следствие, уменьшается пробивное напряжение промежутка стержень–плоскость.

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

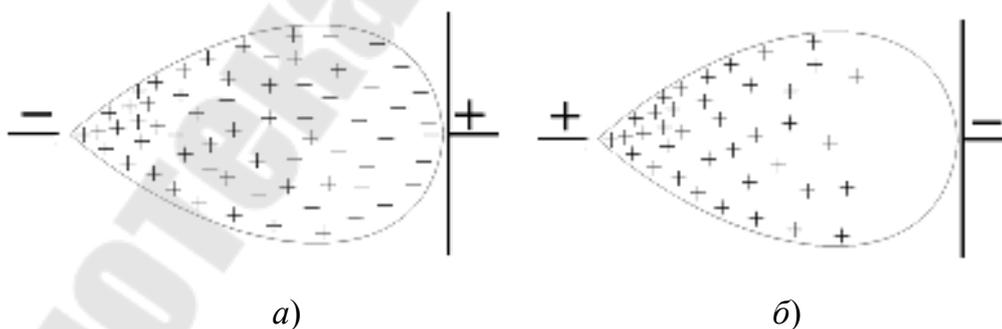


Рис. 3.3. Развитие разряда в резко-неоднородном электрическом поле при различной полярности электродов: а – игла имеет отрицательный заряд; б – игла имеет положительный заряд

Пробивное напряжение газового промежутка при положительном стержне меньше, чем при отрицательном.

Описание лабораторной установки

Для определения электрической прочности воздушного промежутка при резко-неоднородном электрическом поле в лабораторной работе используется установка постоянного тока (рис. 3.4).

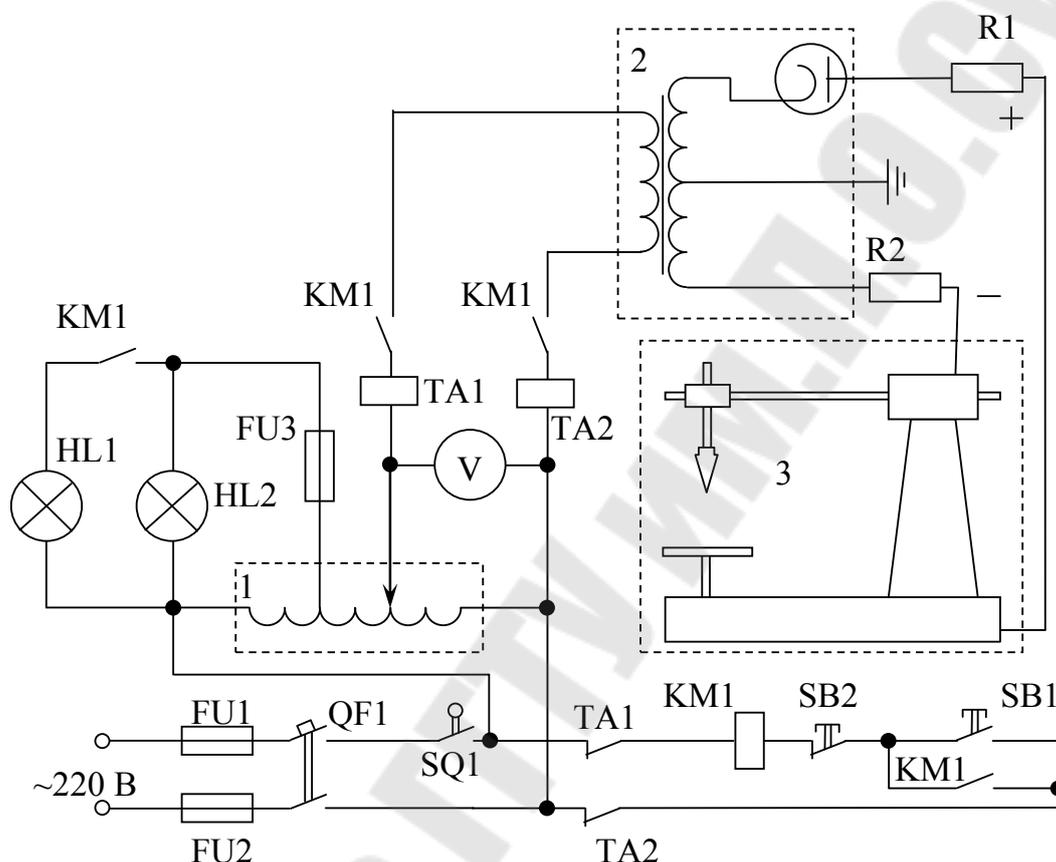


Рис. 3.4. Принципиальная схема испытательной установки переменного тока:
1 – регулировочный трансформатора; 2 – испытательный трансформатор с кенотроном; 3 – разрядник

Питание установки осуществляется от сети однофазного переменного напряжения 220 В через предохранители FU1, FU2 и автоматический выключатель QF1. Работа установки возможна только при закрытой двери ограждения, что обеспечивает замыкание конечного выключателя SQ1. При включении лабораторного стенда в электрическую сеть и закрытой двери ограждения, напряжение подается на регулировочный трансформатор 1, что приводит к зажиганию лампы HL2 зеленого цвета. Для подачи питания на испытательный трансформатор 2 необходимо вывести регулировочный трансформатор в минимальное положение и нажать кнопку SB1 «Вкл.», что приводит

к срабатыванию магнитного пускателя КМ1 и замыканию всех его контактов и зажиганию лампы HL2 красного цвета. Высоковольтное напряжение с испытательного трансформатора 2 подается на электроды разрядника 3 через буферные сопротивления R1 и R2, которые служат для защиты измерительного трансформатора от перегрузок при пробое воздушного промежутка в разряднике. Выпрямление переменного напряжения осуществляется кенотроном (выпрямительной электровакуумной лампой – аналогом диода), который расположен в баке трансформатора.

Питание первичной обмотки испытательного трансформатора осуществляется через токовые реле ТА1 и ТА2. Пробой воздушного промежутка приводит к протеканию большого тока через токовые реле и их срабатыванию. Срабатывание токовых реле вызывает размыкание контактов ТА1 и ТА2 в цепи питания магнитного пускателя, что в свою очередь отключает первичную обмотку испытательного трансформатора от сети. Прерывание питания магнитного пускателя вызывает так же нажатие кнопки SB2 «Откл.».

Расчет напряжения пробоя осуществляется по формулам (2.2), (2.3) из лабораторной работы № 2.

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 и отключить установку кнопкой «Откл.».

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

2.3. С помощью изолирующей штанги наложить заземление на высоковольтные выводы установки для снятия остаточного статического заряда.

2.4. Открыть дверь, войти в ячейку и после этого можно производить операции за ограждением.

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

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться со схемой испытательной установки.
2. Подготовить таблицы для внесения результатов измерений (две таблицы для разных полярностей электродов).
3. Определить коэффициент трансформации испытательного трансформатора по паспортным данным, расположенным на шильде трансформатора.

Ход работы

1. При выключенной установке закрепить на разряднике электроды по схеме «Игла-плоскость» и установить расстояние между ними в соответствии с табл. 3.1.

Таблица 3.1

Расстояния между электродами в сантиметрах

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

2. Установить в минимальное положение регулировочный автотрансформатор.
3. Включить установку в сеть напряжением 220 В. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа HL2.
4. Включить установку нажатием кнопки «Вкл.» и подать напряжение на испытательный трансформатор. При этом должна загореться красная сигнальная лампа HL1.
5. С помощью регулировочного автотрансформатора изменять напряжение от нуля до пробивного значения со скоростью 1 кВ/с. В момент пробоя сработают реле максимального тока ТА1 и ТА2, что приведет к отключению установки.
6. Записать значение напряжения на первичной обмотке испытательного трансформатора U_V в табл. 3.2. Для каждого эксперимента производится три измерения пробивного напряжения.

Результаты измерений и расчетов

Номер эксперимента	Изменяемые величины				Вычисленные значения		
	$U_V^1, В$	$U_V^2, В$	$U_V^3, В$	$h, мм$	$U_V^{среднее}, В$	$U_{ПР}, кВ$	$E_{ПР}, кВ/мм$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

7. Повторить пункты 2–6 для всех заданных расстояний между электродами в соответствии с табл. 3.1.

8. На максимальном расстоянии между электродами (табл. 3.1) зарисовать форму искры. Для этого можно воспользоваться видеокамерой сотового телефона. Дать словесное описание искры и всех эффектов, сопровождавших ее появление.

9. Повторить пункты 2–8 для формы электродов «Плоскость–игла».

10. Произвести необходимые вычисления по формулам (2.3), (2.2) и (2.1) из лабораторной работы № 2. Занести их в таблицы. При этом $U_V^{среднее}$ – среднее арифметическое измеренных значений напряжения за три измерения.

11. Построить графики зависимости $E_{ПР} = f(h)$ и сделать выводы по полученным результатам.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель и содержание лабораторной работы.
3. Схема испытательной установки.
4. Таблицы с данными измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей $U_{ПР} = f(h)$.
6. Выводы о проделанной работе.

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?

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

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

Краткие теоретические сведения

Электрическая изоляция не может выдерживать приложенного к ней неограниченно высокого напряжения. Если мы будем повышать приложенное к изоляции напряжение, то рано или поздно произойдет пробой изоляции. При этом ток утечки, идущий через изоляцию, чрезвычайно резко возрастает, а сопротивление изоляции соответственно снижается так, что практически получается короткое замыкание между электродами.

Наибольшее значение напряжения, которое было приложено к изоляции в момент пробоя, называется пробивным напряжением. В месте пробоя возникает искра или даже электрическая дуга, которая может вызвать оплавление, обгорание, растрескивание и тому подобные изменения как диэлектрика, так и электродов. После снятия напряжения в пробитом твердом диэлектрике может быть обнаружен след пробоя в виде пробитого проплавленного, прожженного или т. п. отверстия, вообще говоря, неправильной формы. При повторном приложении напряжения к ранее подвергавшейся пробую твердой изоляции пробой по месту прежнего пробоя, как правило, происходит при сравнительно низком напряжении. Таким образом, пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и т. п. означает аварию, выводящую данное устройство из строя.

Пробивное напряжение электрической изоляции зависит от ее толщины, т. е. расстояния между электродами h . Чем толще слой электроизоляционного материала, тем выше пробивное напряжение этого слоя. Однако слои одной и той же толщины, но различных материалов имеют различные значения пробивного напряжения. Это дает основание для введения параметра диэлектрического материала, определяющего его способность противостоять пробую – *электрическая прочность*. Электрическая прочность диэлектрика определяется по выражению (2.1) из лабораторной работы № 2.

По физической сущности развития пробоя различают несколько видов. Основные из них: чисто электрический, электротепловой, электромеханический, электрохимический и ионизационный пробой.

Чисто электрический пробой представляет собой непосредственное разрушение структуры диэлектрика силами электрического поля, действующими на электрически заряженные частицы в диэлектрике. Чисто электрический пробой развивается в диэлектрике мгновенно. Различают электрический пробой однородных и неоднородных диэлектриков.

Электротепловой пробой связан с нагревом изоляции в электрическом поле благодаря диэлектрическим потерям. Этот вид пробоя развивается следующим образом: когда на диэлектрик подается напряжение, в нем выделяется тепло диэлектрических потерь и температура его повышается, вследствие чего потери еще более увеличиваются, и процесс идет, таким образом, усиливаясь до тех пор, пока собственная электрическая прочность диэлектрика не снизится настолько, что произойдет пробой.

Электрохимический пробой может наблюдаться, например, у хрупких материалов в сильно неоднородном электрическом поле подготавливается механическим разрушением материала (образованием макроскопических трещин) силами электрического поля.

Электрохимический пробой – вид медленно развивающегося пробоя, связанного с химическим изменением материалов в электрическом поле (пример – прораствание металлических древесных побегов – «дендритов» в результате электролиза). Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной.

Ионизационный пробой объясняется воздействием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа.

Расчет напряжения пробоя осуществляется по формулам (2.2), (2.3) из лабораторной работы № 2.

Описание лабораторной установки

Для определения электрической прочности воздушного промежутка в лабораторной работе используется установка переменного тока (рис. 4.1).

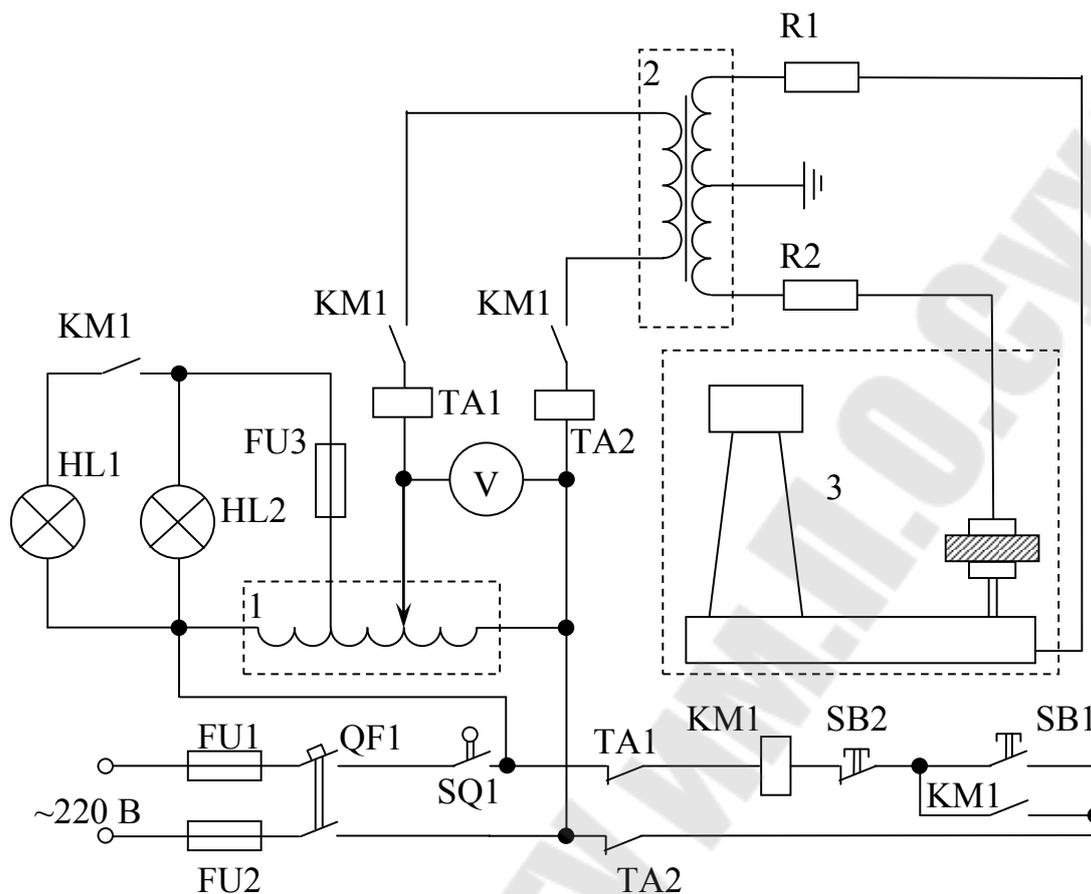


Рис. 4.1. Принципиальная схема испытательной установки переменного тока:
 1 – регулировочный трансформатора; 2 – испытательный трансформатор;
 3 – разрядник

Питание установки осуществляется от сети однофазного переменного напряжения 220 В через предохранители FU1, FU2 и автоматический выключатель QF1. Работа установки возможна только при закрытой двери ограждения, что обеспечивает замыкание конечного выключателя SQ1. При включении лабораторного стенда в электрическую сеть и закрытой двери ограждения, напряжение подается на регулировочный автотрансформатор 1, что приводит к зажиганию лампы HL2 зеленого цвета. Для подачи питания на испытательный трансформатор 2 необходимо вывести регулировочный автотрансформатор в минимальное положение и нажать кнопку SB1 «Вкл.», что приводит к срабатыванию магнитного пускателя KM1 и замыканию всех его контактов и зажиганию лампы HL2 красного цвета. Высоковольтное напряжение с испытательного трансформатора 2 подается на разрядник 3 через буферные сопротивления R1 и R2, которые служат для защиты измерительного трансформатора от перегрузок при пробое диэлектрика.

Питание первичной обмотки испытательного трансформатора осуществляется через токовые реле ТА1 и ТА2. Пробой диэлектрика приводит к протеканию большого тока через токовые реле и их срабатыванию. Срабатывание токовых реле вызывает размыкание контактов ТА1 и ТА2 в цепи питания магнитного пускателя, что в свою очередь отключает первичную обмотку испытательного трансформатора от сети. Прерывание питания магнитного пускателя вызывает так же нажатие кнопки SB2 «Откл.».

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 и отключить установку кнопкой «Откл.».

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

2.3. С помощью изолирующей штанги наложить заземление на высоковольтные выводы установки для снятия остаточного статического заряда.

2.4. Открыть дверь, войти в ячейку и после этого можно производить операции за ограждением.

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

Задание на допуск к лабораторной работе

1. Ознакомиться со схемой испытательной установки.
2. Подготовить таблицу для внесения результатов измерений.
3. Определить коэффициент трансформации испытательного трансформатора по паспортным данным, расположенным на шильде трансформатора.

Ход работы

1. При выключенной установке зафиксировать между электродами испытуемый диэлектрик. Образцы испытуемых материалов помещают в горизонтальной плоскости между двумя электродами, при-

чем размеры образцов должны быть больше размера электродов, чтобы избежать поверхностного перекрытия.

2. В соответствии с заданием преподавателя установить необходимое количество слоев испытуемого диэлектрика.

3. Установить в минимальное положение регулировочный автотрансформатор.

4. Включить установку в сеть напряжением 220 В. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа HL2.

5. Включить установку нажатием кнопки «Вкл.» и подать напряжение на испытательный трансформатор. При этом должна загореться красная сигнальная лампа HL1.

6. С помощью регулировочного автотрансформатора изменять напряжение от нуля до пробивного значения со скоростью 1 кВ/с. В момент пробоя сработают реле максимального тока ТА1 и ТА2, что приведет к отключению установки.

7. Записать величину напряжения на первичной стороне испытательного трансформатора в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений и расчетов

Наименование образцов диэлектрика	Число слоев диэлектрика	Измеряемые величины		Вычисленные значения	
		U_1 , В	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм

8. Выполнить пункты 2–7 для всех заданных преподавателем диэлектрических материалов и количества слоев.

9. Произвести необходимые вычисления по формулам (2.3), (2.2) и (2.1) из лабораторной работы № 2.

10. Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

11. Сделать выводы по полученным результатам.

Содержание отчета

1. Титульный лист.

2. Цель и содержание лабораторной работы.

3. Схема испытательной установки.

4. Таблица с данными измерений и вычислений.

5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется пробоем диэлектрика?
2. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
3. Какие вы знаете виды пробоев твердого диэлектрика?
4. Объясните физическую сущность электрического пробоя твердого диэлектрика.
5. Объясните физическую сущность электротеплового пробоя твердого диэлектрика.
6. Объясните физическую сущность электромеханического пробоя твердого диэлектрика.
7. 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 др. На практике по составу газа, выделяющегося из масла в работающем аппарате, можно заблаговременно судить о характере развивающегося повреждения в аппарате.

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, кВ/мм
До 15 кВ включительно	20/2,5
От 15 до 35 кВ включительно	25/2,5
От 60 до 220 кВ включительно	35/2,5
От 330 до 500 кВ	45/2,5
750 кВ	55/2,5

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.

Изоляционные свойства масла, бывшего в эксплуатации, могут быть восстановлены в процессе *сушки масла*. При этом масло обрабатывается искусственными цеолитами (молекулярные сита). Для очистки от механических загрязнений, масло фильтруют через пористые перегородки, а также через магнитные фильтры.

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

При высоких значениях напряженности электрического поля происходит вырывание электронов из металлических электродов и разрушение молекул масла из-за ударов заряженными частицами. При этом повышенная электрическая прочность жидкого диэлектрика по сравнению с газообразным обусловлена меньшей длиной свободного пробега электронов.

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.

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 отобранный в один сосуд из емкости для хранения, 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.

Сосуд с пробой жидкого материала несколько раз осторожно переворачивают вверх дном с тем, чтобы содержащиеся в пробе случайные загрязнения равномерно распределились по всему объему жидкости. При этом избегают интенсивного встряхивания во избежание попадания в жидкость пузырьков воздуха. Непосредственно после этого небольшим количеством жидкости ополаскивают ячейку, в том числе электроды, затем медленно заполняют ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости стекала по ее стенке, и не образовывалось пузырьков воздуха. 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 межэлектродного пространства, не допуская при этом образования воздушных пузырьков.

Для одной пробы жидкого диэлектрика должно быть проведено шесть пробоев.

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

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

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

Электронная установка УИМ-90м предназначена для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков.

Установка имеет испытательный отсек, где размещается измерительная ячейка. Испытательный отсек закрывается прозрачной крышкой, снабженной блокировкой. При открытой крышке включение высокого напряжения блокируется. При открывании крышки во время испытаний высокое напряжение отключается, регулятор напряжения выводится в исходное положение.

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. 5.1.

Схема состоит из электронного блока управления, блока индикации, регулировочного автотрансформатора TR1, электродвигателя M1, высоковольтного маслонаполненного повышающего трансформатора TR2 и концевых выключателей SA1 и SA2.

В процессе испытаний блок управления подает напряжение на электродвигатель M1, ротор которого механически связан с подвижным регулятором автотрансформатора TR1. В результате напряжение на выходе автотрансформатора 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.

С помощью концевого выключателя SA1 контролируется максимальное положение регулятора автотрансформатора для последующей автоматической остановки электродвигателя. С помощью концевого выключателя SA2 фиксируется открытие испытательного отсека.

На панели управления установки расположены: цифровой индикатор выходного испытательного напряжения (единица измерения – кВ), светодиодные индикаторы режима работы и кнопки управления. Назначение светодиодных индикаторов приведено в табл. 5.2, а назначение кнопок управления приведено 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 время в минутах. По окончании 5 мин выдается звуковой сигнал. При включенном режиме таймера режим испытаний не запускается
	Включение/выключение режима испытаний. В этом режиме на дисплее отображается текущее значение испытательного напряжения 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

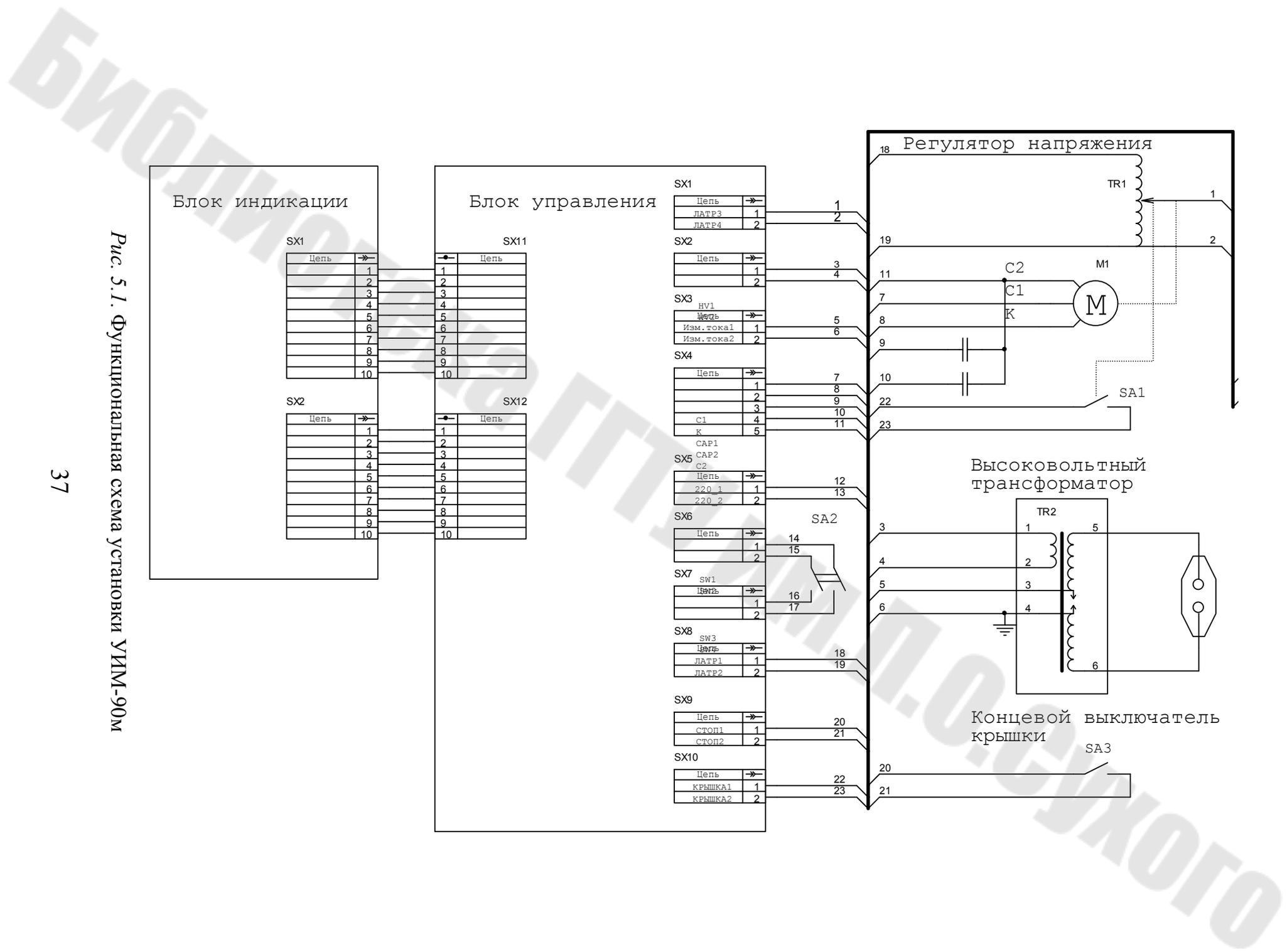
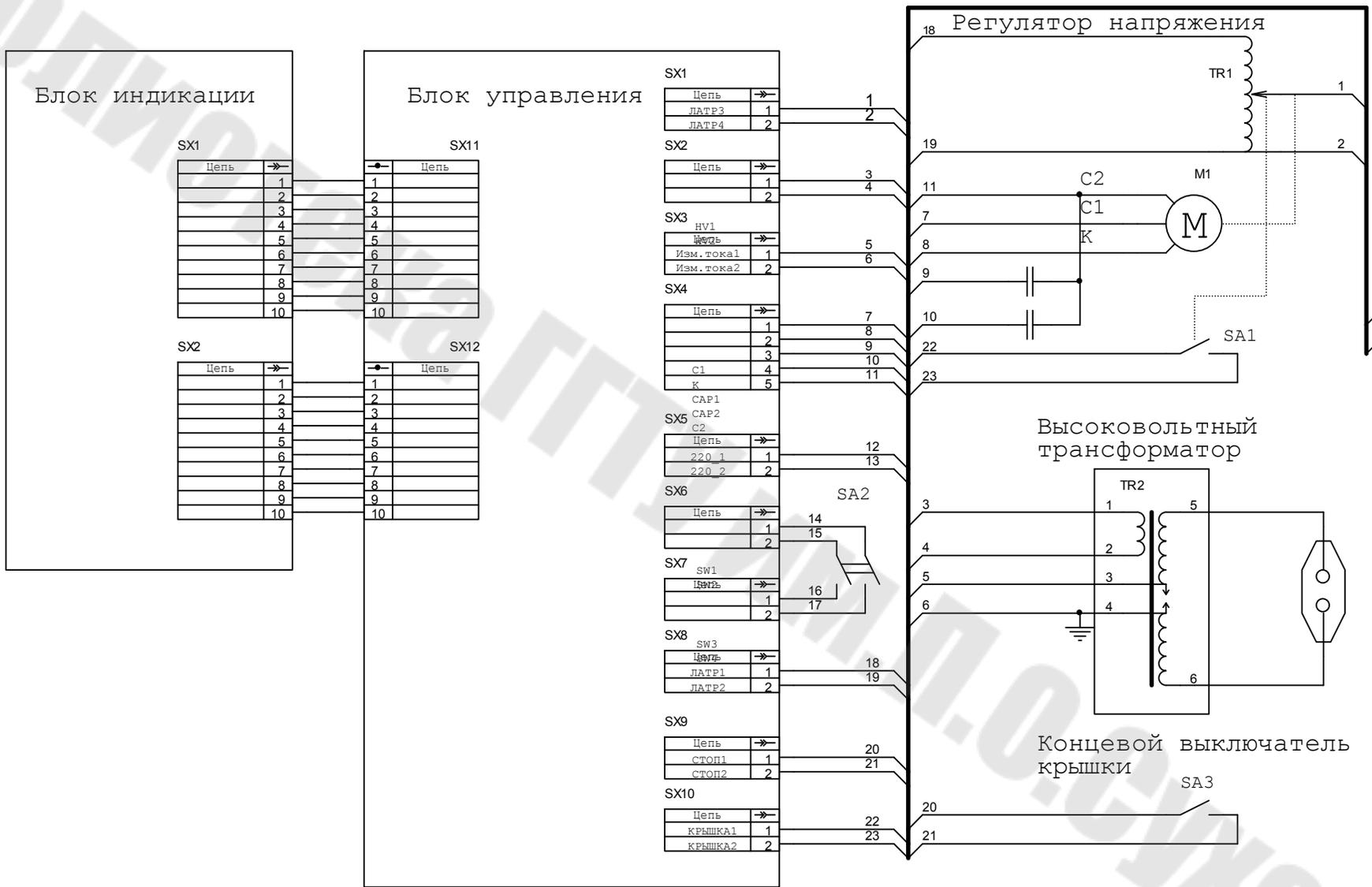


Рис. 5.1. Функциональная схема установки УИМ-90М



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.
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.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

Подключать установку к розетке сети питания 220 В с отсутствующим, либо неисправным заземляющим контактом, т. к. 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 таблицы для измерений.

Ход работы

1. Убедитесь в наличии трансформаторного масла в испытательном отсеке установки.
2. Убедитесь, что тумблер сетевого питания установки находится в отключенном положении.
3. Включите установку 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.

4. Проведите шесть пробоев масла каждые 5 мин, используя для отсчета времени режим таймера установки. После каждого пробоя отключите тумблер сетевого питания установки и при помощи чистой стеклянной или пластмассовой палочки осторожно удалите твердые продукты разложения с поверхности электродов. При этом избегайте возникновения пузырьков воздуха в масле.

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

6. Сделайте расчеты по формулам (5.1)–(5.4). Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, то проведите дополнительные измерения, как указано в разделе по теоретическим сведениям.

7. Отключите установку с помощью тумблера и из сети.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенная схема установки (упростите схему на рис. 4.1 самостоятельно или с помощью преподавателя).
3. Описание порядка испытаний с результатами измерений и расчетов.
4. Описание формы электрической дуги в масле.
5. 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 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Цель работы: освоить методику испытаний трансформаторного масла с помощью микропроцессорной установки «Тангенс-3М».

Краткие теоретические сведения

Одним из основных параметров, характеризующих качество трансформаторного масла как диэлектрика, является тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ (тангенс дельта).

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Любой диэлектрик, в том числе и трансформаторное масло, может быть представлен в виде параллельной схемы замещения, как показано на рис. 6.1, а. Векторная диаграмма, построенная по этой схеме, приведена на рис. 6.1, б.

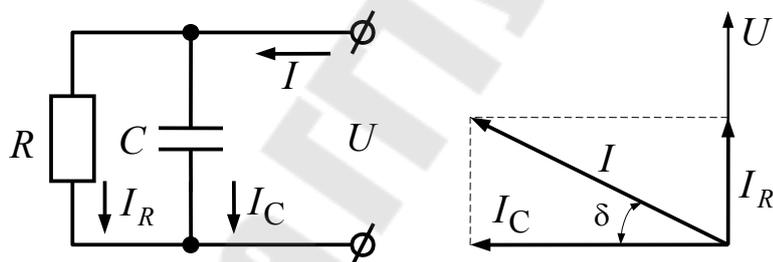


Рис. 6.1. Параллельная схема замещения диэлектрика (а) и векторная диаграмма для параллельной схемы замещения (б)

Угол диэлектрических потерь δ – это угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 6.1, б).

Активная мощность, выделяющаяся на сопротивлении R в схеме замещения, равна диэлектрическим потерям. Для параллельной схемы замещения эти потери рассчитываются по формуле

$$P = UI_R = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta. \quad (6.1)$$

Из формулы (6.1) следует, что чем выше значение $\operatorname{tg}\delta$, тем больше потери активной мощности в диэлектрике.

Тангенс угла диэлектрических потерь масла возрастает с увеличением температуры. В табл. 6.1 приведены максимально допустимые значения $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла для различных температур.

Таблица 6.1

Максимально допустимые значения $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла в зависимости от его температуры θ

Параметры	Значения				
$\theta, ^\circ\text{C}$	20	40	60	70	90
$\text{tg}\delta$	0,0015	0,004	0,008	0,015	0,022

Если значения $\text{tg}\delta$ превышают приведенные в табл. 6.1, то масло не пригодно для эксплуатации.

Измерение значения $\text{tg}\delta$ осуществляется с помощью так называемых мостовых схем, как показано на рис. 6.2.

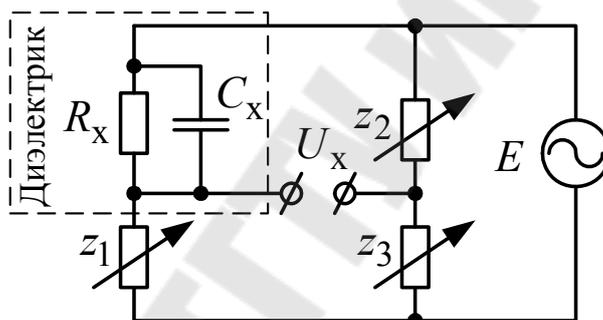


Рис. 6.2. Мостовая схема для измерения $\text{tg}\delta$

Схема состоит из исследуемого диэлектрика, представленного параметрами параллельной схемы замещения R_x, C_x , трех настраиваемых сопротивлений z_1-z_3 , имеющих как активную так и реактивную составляющие, и источника переменного напряжения E . Напряжение U_x называется напряжением небаланса моста. Изменение параметров сопротивлений z_1-z_3 осуществляется до достижения практически нулевого значения напряжения U_x . Значение $\text{tg}\delta$ рассчитывают на основе полученных значений активных и реактивных составляющих сопротивлений z_1-z_3 .

В современных микропроцессорных измерительных приборах регулировка параметров сопротивлений z_1-z_3 осуществляется специальными электронными схемами совместно с программным обеспечением прибора.

Описание лабораторной установки

Автоматизированная установка измерения диэлектрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М» (в дальнейшем по тексту – установка) предназначена для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь трансформаторного масла при частоте 50 Гц.

Установка измеряет диэлектрическую проницаемость, емкость, тангенс угла потерь, напряжение, приложенное к измерительной ячейке (далее рабочее напряжение), температуру пробы трансформаторного масла.

Установка состоит из блока измерительного, блока нагревателя с регулятором мощности, источника высокого напряжения и измерительной ячейки трехэлектродного типа. На задней панели установки расположен тумблер включения сетевого питания.

На рис. 6.3 приведена функциональная схема установки.

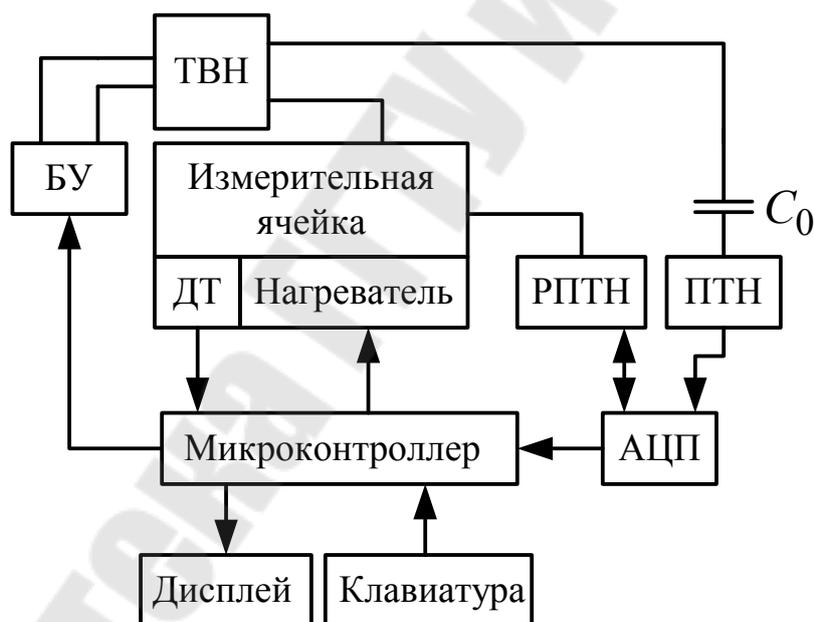


Рис. 6.3. Функциональная схема установки «Тангенс-3М»:

ТВН – трансформатор высокого напряжения; БУ – блок управления;

ДТ – датчик температуры; ПТН – преобразователь ток-напряжение;

РПТН – регулируемый преобразователь ток-напряжение;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Прибор оборудован блокировкой, исключающей возможность подачи высокого напряжения и включения нагревателя при выдвинутой панели. Блок высокого напряжения имеет схему защиты от пробоев.

Работой установки управляет микроконтроллер – микросхема, внутри которой реализованы все основные элементы микропроцессорной системы.

Микроконтроллер с помощью блока управления БУ осуществляет подачу напряжения на первичную обмотку повышающего трансформатора высокого напряжения ТВН. На вторичной обмотке ТВН формируется напряжение значением до 2000 В. Это напряжение подается на мостовую схему, образованную измерительной ячейкой, образцовым конденсатором C_0 , преобразователем ток-напряжение ПТН и регулируемым преобразователем ток-напряжение РПТН. Микроконтроллер изменяет входное сопротивление РПТН до тех пор, пока разность токов в плечах моста не станет равной нулю, что соответствует минимуму напряжения небаланса (рис. 6.2). Полученные значения токов с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП измеряются микроконтроллером. Одновременно микроконтроллер управляет работой нагревателя измерительной ячейки и считывает показания с датчика температуры ДТ.

Программное обеспечение микроконтроллера осуществляет расчет требуемых величин и отображает их на дисплее.

Назначение кнопок установки приведено в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Назначение кнопок установки «Тангенс-3М»

Обозначение кнопки	Назначение
«↑»	Аналог кнопки «Shift»
«←» «↑» «→» «↓»	Управление курсором
«└ МЕНЮ»	Вход в режимы меню и подтверждение ввода
«СТОП»	Остановка программы, выход в основное меню
«ПУСК 1» «ПУСК 2»	Выбор режима измерений
$C_0, \text{tg}\delta_0$	Измерение параметров пустой ячейки (калибровка)

Меню установки «Тангенс-3М» имеет следующие основные режимы: «Проба масла», «Выбор ячейки», «Время и дата», «Просмотр архива».

В меню «Проба масла» оператор присваивает пробе масла индивидуальный номер.

В меню «Выбор ячейки» оператор выбирает номер используемой измерительной ячейки. Установка может работать с шестью раз-

ными ячейками, параметры которых (емкость и $\text{tg}\delta$) сохраняются в энергонезависимой памяти и доступны для просмотра из меню.

В меню «Время и дата» оператор корректирует показания системных часов.

В меню «Просмотр архива» есть три подменю: «Дата и время», «Проба масла», «Весь архив».

В подменю «Дата и время» оператору предлагается ввести промежуток времени, в котором будет произведен поиск результатов. При помощи кнопок «0»–«9» меняются числовые значения, а при помощи одновременного нажатия кнопок «←» или «→» с кнопкой «↑» меняется позиция ввода. После нажатия на кнопку «↓ МЕНЮ» на дисплей выводятся следующие параметры: дата и время измерения; температура диэлектрика на момент измерения (T); значение испытательного напряжения (U); номер пробы диэлектрика (Pr); номер записи в архиве (N); относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_x); тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}D$). Перемещение между записями осуществляется кнопками «↑» и «↓».

В подменю «Проба масла» оператор вводит номер пробы, и после нажатия на кнопку «↓ МЕНЮ» на дисплее можно просматривать все измерения для введенного номера пробы.

В подменю «Весь архив» можно просматривать все измерения, записанные в архиве. При нажатии «↑» отображается следующая запись в архиве, при нажатии «↓» – предыдущая. При нажатии «←» номер записи уменьшается на 10, при нажатии «→» – увеличивается на 10.

Для определения емкости и тангенса угла потерь пустой ячейки необходимо произвести измерение нажатием кнопки C_0 , $\text{tg}\delta_0$. В результате на дисплее отобразятся измеренные величины: напряжение (U) в вольтах, емкость (C_0) в пикофарадах и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}D$). Затем нужно нажать кнопку «СТОП» и подтвердить запись измеренных данных в память. В дальнейшем полученные значения C_0 и $\text{tg}\delta_0$ установка будет учитывать для данной ячейки во всех измерениях.

При нажатии кнопки «ПУСК 1» происходит определение параметров масла при температурах: комнатной, 70 и 90 °С.

При нажатии кнопки «ПУСК 2» происходит определение параметров масла при температурах: комнатной, 70, 80 и 90 °С, далее нагрев до 95 °С, остывание ячейки и измерение параметров через 10 °С до температуры 70 °С.

В обоих режимах вначале установка, не включая нагреватель, подает высокое напряжение на ячейку и производит первое измерение при комнатной температуре. Результаты измерения выводятся на дисплей. В верхней строке отображается режим работы термостата (нагрев или установка), текущая температура масла (T). В следующей строке отображается температура, при которой было проведено измерение (T) и значение подаваемого напряжения (U). Третья строка отображает измеренное значение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}D$). В нижней строке приведены значения диэлектрической проницаемости (ϵ) и номера пробы масла (Pr). При этом диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_0}, \quad (6.2)$$

где C_x – емкость ячейки с маслом; C_0 – емкость пустой ячейки.

Затем выключается высокое напряжение, включается нагреватель. При достижении требуемой температуры производится выдержка (не менее 10 мин) для выравнивания температуры в объеме ячейки. После этого снова включается высокое напряжение, производится измерение и обновляются показания на дисплее.

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.
4. Во время проведения измерений прикасаться к измерительной ячейке строго запрещается.
5. Работать с горячей испытательной ячейкой запрещается.
6. При обнаружении разлива масла произвести очистку испытательного отсека с помощью мягкой бумаги.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

Подключать установку к розетке сети питания 220 В с отсутствующим, либо неисправным заземляющим контактом, т. к. 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 таблицы для измерений.

Ход работы

1. Сдвиньте крышку испытательного отсека вправо. Снимите круглую крышку поворотом против часовой стрелки. Извлеките верхний электрод и осторожно извлеките испытательную ячейку. Убедитесь в отсутствии масла на дне отсека. При его наличии удалите масло с помощью мягкой бумаги.
2. Вновь соберите испытательный отсек и закройте его.
3. Убедитесь, что тумблер сетевого питания находится в отключенном положении. Подключите прибор к сети, включите его питание.
4. Установите текущую дату и точное время.
5. Задайте номер ячейки в соответствии с номером бригады. Запишите параметры пустой ячейки с этим номером.
6. Задайте номер пробы путем сложения номеров в журнале всех членов бригады.
7. Выпишите из архива установки результаты любых четырех измерений за промежуток времени, указанный преподавателем.
8. Запустите измерения в режиме «Пуск 1».
9. Запишите результаты измерений для трех фиксируемых температур.
10. Отключите установку с помощью тумблера и из сети.
11. Рассчитайте для каждой из температур значения емкости ячейки с маслом по формуле (6.2) и диэлектрических потерь в масле по формуле (6.1).
12. Постройте графики зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости масла от температуры.
13. Для каждой из температур рассчитайте значение активного сопротивления в параллельной схеме замещения (рис. 6.1), самостоятельно получив расчетную формулу.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Упрощенная схема установки (рис. 6.3).
3. Описание порядка испытаний с результатами измерений и расчетов.
4. Выводы по результатам всех измерений и расчетов о пригодности масла к эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Что такое $\operatorname{tg}\delta$?
2. Сделайте полный математический вывод формулы (6.1).
3. Как измеряют $\operatorname{tg}\delta$?
4. Как работает прибор «Тангенс-3М»?
5. Какие виды меню есть в приборе «Тангенс-3М»?

Лабораторная работа № 7 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 рассчитывается по формуле

$$\rho(\theta) = \rho_0(1 + \alpha\theta), \quad (7.1)$$

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. 7.1.

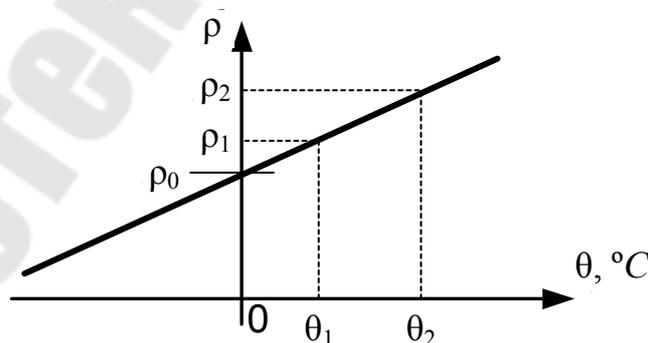


Рис. 7.1. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

Значения ТКС и ρ_0 можно определить при двух значениях температуры θ_1 и θ_2 , составив систему уравнений на основе формулы (7.1):

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0(1 + \alpha\theta_1); \\ \rho_2 = \rho_0(1 + \alpha\theta_2). \end{cases} \quad (7.2)$$

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле

$$R_{\text{эл}} = \rho \frac{l}{S}, \quad (7.3)$$

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 не линейна, близка к экспоненциальной зависимости и может быть записана в виде:

$$R(\theta) = Ae^{-B\theta}, \quad (7.4)$$

где A и B – некоторые коэффициенты.

Эта зависимость приведена на рис. 7.2.

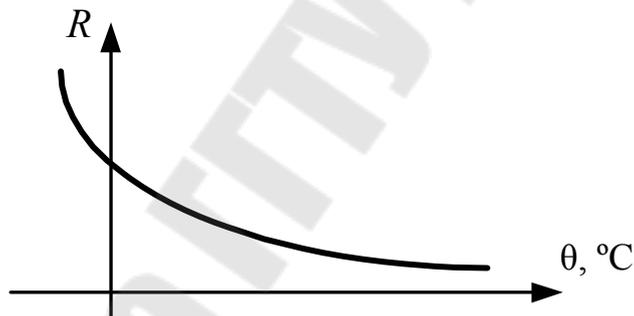


Рис. 7.2. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры

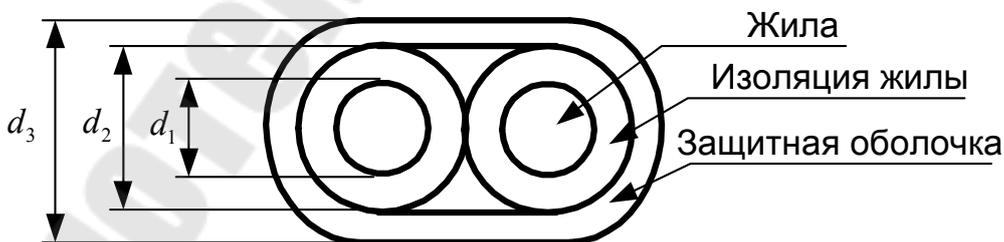


Рис. 7.3. Конструкция двухжильного кабеля

Рассмотрим двухжильный кабель, конструкция которого показана на рис. 7.3.

Тепловые процессы подобны электрическим процессам, так как описываются аналогичными дифференциальными уравнениями.

Для рассматриваемого кабеля, считая, что токи в жилах равны, а все элементы кабеля – это однородные тела (у однородного тела характеристики одинаковы по всему его объему), можно составить электрическую аналогию – тепловую схему замещения, которая приведена на рис. 7.4.

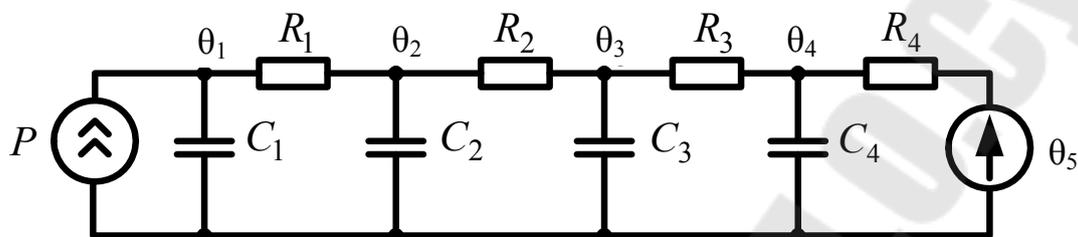


Рис. 7.4. Тепловая схема замещения двухжильного кабеля

На рис. 7.4 обозначено: P – потери активной мощности в кабеле; $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – соответственно, температуры жилы, изоляции жилы, защитной оболочки и поверхности кабеля; θ_5 – температура воздуха; R_1, R_2, R_3, R_4 – соответственно, тепловые сопротивления жилы, изоляции жилы, защитной оболочки и поверхности кабеля; C_1, C_2, C_3, C_4 – соответственно, теплоемкости жилы, изоляции жилы и защитной оболочки кабеля.

В такой схеме напряжения – это температуры, токи – это потери мощности.

Для установившегося теплового режима тепловая схема замещения преобразуется к виду, показанному на рис. 7.5.

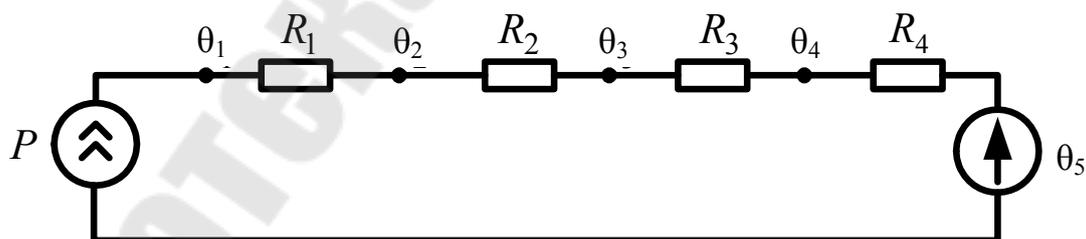


Рис. 7.5. Тепловая схема замещения двухжильного кабеля для установившегося теплового режима

Тепловые сопротивления имеют размерность $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и рассчитываются по аналогии с электрическими сопротивлениями с учетом того, что тепловой поток распространяется от центра токоведущей жилы к периферии кабеля:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{\gamma_1} \frac{d_1}{S_1} = \frac{1}{\gamma_1} \frac{d_1}{\pi \cdot d_1 \cdot l} = \frac{1}{\gamma_1 \cdot \pi \cdot l}; \\
 R_2 &= \frac{1}{\gamma_2} \frac{d_2 - d_1}{S_2} = \frac{d_2 - d_1}{\gamma_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot l}; \\
 R_3 &= \frac{2}{\gamma_3} \frac{d_3 - d_2}{S_3} = \frac{2(d_3 - d_2)}{\gamma_3 \cdot \pi \cdot d_3 \cdot l}; \\
 R_4 &= \frac{0,1}{\pi \cdot d_3 \cdot l}.
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – удельные теплопроводности, соответственно, материалов жилы, основной изоляции и защитной оболочки $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$;

S_1, S_2, S_3 – площади поверхностей теплоотдачи, соответственно, жилы, основной изоляции и защитной оболочки; d_1, d_2, d_3 – диаметры, соответственно, жилы, основной изоляции и защитной оболочки; l – длина кабеля.

При расчете переходного (нестационарного) теплового процесса (т. е. изменения температуры от времени рассматриваемого элемента кабеля при скачкообразном изменении тока через кабель) необходимо также знать значения теплоемкостей. При этом сам переходный тепловой процесс будет представлять собой сумму четырех экспоненциальных составляющих со своими постоянными времени. Однако на практике часто рассматривают переходные тепловые процессы в кабеле в первом приближении, считая, что имеется только одна экспоненциальная составляющая с постоянной времени, равной тепловой постоянной времени кабеля.

Тепловая постоянная времени кабеля – это время, за которое температура жилы кабеля изменится на 63,2 % по отношению к установившемуся значению этой температуры $\theta_{\text{уст}}$ после скачкообразного изменения тока в кабеле при постоянной температуре окружающей среды. Различают тепловые постоянные времени нагрева $\tau_{\text{н}}$ и охлаждения $\tau_{\text{о}}$ кабеля. Порядок графического определения тепловых постоянных времени кабеля показан на рис. 7.6.

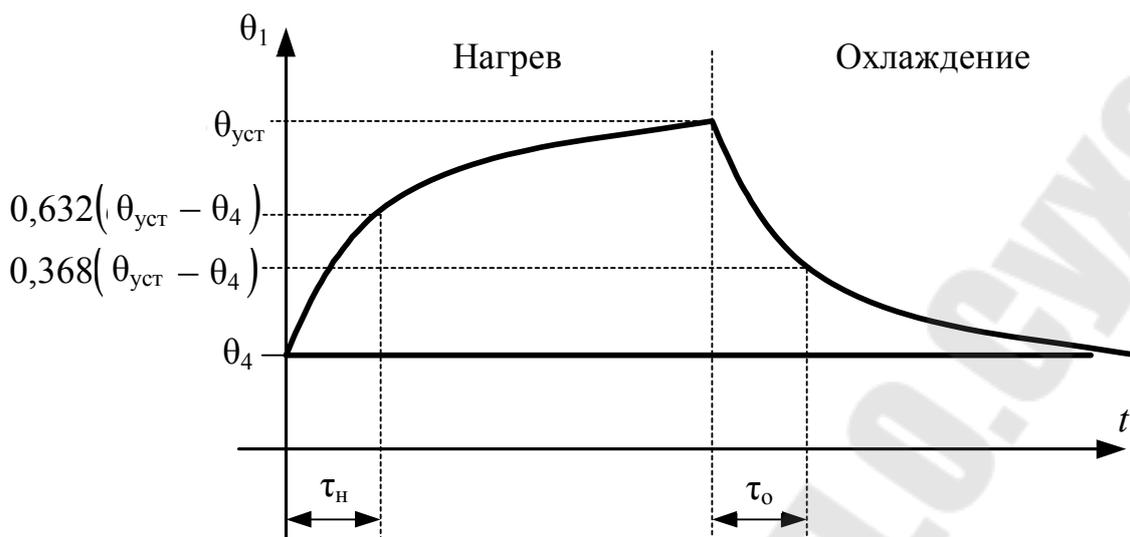


Рис. 7.6. Графическое определение тепловых постоянных времени нагрева и охлаждения кабеля

Описание лабораторной установки

Детальное описание лабораторной установки приведено в Паспорте к лабораторному стенду.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 7.7.

Сетевое напряжение 220 В через автоматический выключатель QF1 подается на лабораторный автотрансформатор Т1 (ЛАТР). При включении автоматического выключателя загорается лампа HL1. Вольтметр PV1 показывает значение выходного напряжения ЛАТРа. Это напряжение через тумблер SA1 подается на понижающий трансформатор Т2, который нагружен на короткозамкнутый двухжильный кабель (рис. 7.3), расположенный на внешней стороне корпуса стенда. Значение тока, протекающего в кабеле, контролируется с помощью амперметра PA1, включенного через измерительный трансформатор тока Т3. Падение напряжения на кабеле измеряется с помощью измерительного преобразователя «напряжение – ток» DA1 и микроамперметра PA2. На жиле кабеля под изоляцией расположен полупроводниковый датчик температуры, сопротивление которого зависит температуры. Он представлен на схеме блоком DA2. К датчику температуры подключен измерительный преобразователь «сопротивление – ток» DA3, выходом соединенный с микроамперметром PA3.

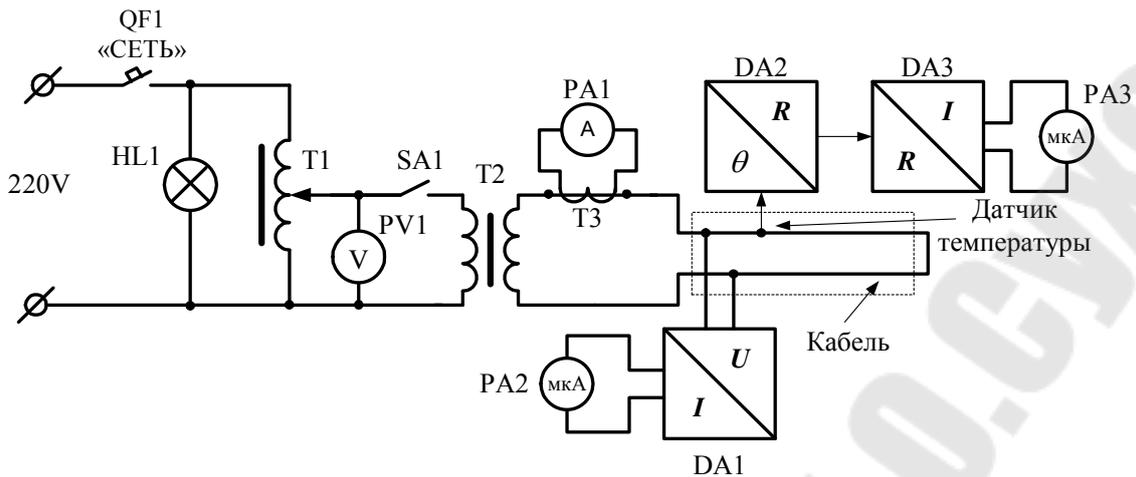


Рис. 7.7. Функциональная схема лабораторной установки

Вольтметр расположен на лицевой панели ЛАТРа, а амперметр и микроамперметры расположены на лицевой панели стенда.

На корпусе стенда закреплен термометр для измерения температуры воздуха.

Параметры кабеля. Две медные жилы, покрытые изоляцией из поливинилхлоридного пластика с оболочкой из поливинилхлоридного пластика с сажевым наполнителем. Длина кабеля: $l = 3,7$ м. Однако с учетом того, что ток протекает по кабелю в обе стороны, необходимо принять $l = 7,4$ м.

Жила (медь):

$$d_1 = 1,18 \text{ мм}; \gamma_1 = 390 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \rho = 0,01762 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Изоляция жилы (полиэтилен):

$$d_2 = 6 \text{ мм}; \gamma_2 = 0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C});$$

Оболочка кабеля (поливинилхлоридный (ПВХ) пластикат):

$$d_3 = 9 \text{ мм}; \gamma_3 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Параметры полупроводникового датчика температуры:

$$A = 13935 \text{ Ом}; B = 0,03349 \text{ } 1/^\circ\text{C}.$$

Для того чтобы получить значения измеряемых величин, показания приборов необходимо умножить на масштабные коэффициенты (множители), приведенные в табл. 7.1.

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

Таблица 7.1

Масштабные коэффициенты (множители) для приборов

Прибор	РА1	РА2	РА3
Назначение	ток в кабеле	падение напряжения на кабеле	сопротивление датчика температуры
Начальные единицы измерения	А	А	А
Множитель	0,5	28736	18148148
Единицы измерения результата	А	В	Ом

Меры по технике безопасности

В лабораторном стенде используется высокое напряжение 220 В, что потенциально опасно для жизни. При работе со стендом необходимо выполнять следующие меры по технике безопасности:

1. В случае обнаружения неисправностей или повреждения проводов отключить питание стенда и позвать преподавателя.
2. Строго следовать методике измерений.

Задание на допуск к лабораторной работе

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

Ход работы

1. Выведите расчетное соотношение для установившегося значения температуры изоляции жилы кабеля на основе схемы, приведенной на рис. 7.5, т. е. для температуры θ_2 .

2. Рассчитайте значения тепловых сопротивлений на основе соотношений (7.5).

3. Выведите расчетное соотношение для определения температуры жилы кабеля на основе сопротивления полупроводникового датчика температуры в соответствии с формулой (7.4).

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

5. Получите у преподавателя значение напряжения, которое нужно выставить на ЛАТРе (в диапазоне от 160 до 240 В).

6. 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 в течение всего интервала измерения каждые 5 мин. Рекомендуется распределить между членами бригады запись показаний приборов.

7. Убедитесь, что регулятор ЛАТРа находится в крайнем левом положении, т. е. сведен на минимум.

8. Установите тумблер SA1 в положение «отключено».

9. Приготовьте ручной секундомер. Например, в сотовом телефоне.

10. Включите стенд.

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

12. Включите тумблер SA1 в положение «включено», 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 мин.

13. По окончании процесса нагрева обнулите секундомер и снова запустите его, одновременно установив тумблер SA1 в положение «отключено», а регулятор ЛАТРа сведите в минимальное положение и начните измерения для процесса охлаждения кабеля. Записывайте показания каждые 30 с в течение 12 мин. Значения температуры воздуха записывайте каждые 5 мин.

14. Выключите стенд.

15. Используя табл. 7.1, пересчитайте показания приборов в требуемые величины. Сведите результаты расчетов в таблицу.

16. Используя выведенное соотношение по п. 3, на основе значений сопротивления полупроводникового датчика температуры рассчитайте экспериментальные значения температуры изоляции жилы. Сведите результаты расчетов в таблицу.

17. Постройте графики процессов нагрева и охлаждения кабеля.

18. Определите графически постоянные времени нагрева и охлаждения кабеля в соответствии с рис. 7.6.

19. Зная значения тока в кабеле, а также значения падения напряжения на кабеле, для процесса нагрева рассчитайте значения электрического сопротивления меди (жила кабеля) по закону Ома (реактивной составляющей сопротивления можно пренебречь) и значения удельного сопротивления меди (жила кабеля) в соответствии с (7.3).

20. Постройте экспериментальный график зависимости удельного сопротивления меди от температуры.

21. Выбрав наиболее линейный участок на графике, определите значение ТКС меди в соответствии с рис. 7.1 и системой (7.2).

22. Используя выведенное соотношение по п. 1, рассчитайте теоретическое значение установившейся температуры изоляции жилы кабеля, приняв потери мощности в кабеле равными экспериментальному значению потерь для установившегося режима нагрева кабеля. Определите погрешность между экспериментальным и теоретическим значением установившейся температуры жилы кабеля.

23. Сделайте выводы по результатам всех измерений и расчетов.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
3. Результаты расчетов с комментариями.
4. 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. Докажите, что размерность теплового сопротивления $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Объясните значения тепловых сопротивлений, полученных в работе.
5. Что такое тепловая схема замещения? Для чего можно использовать схему, приведенную на рис. 7.4?
6. Что такое классы нагревостойкости изоляции?

Литература

1. Зализный, Д. И. Курс лекций для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / Д. И. Зализный, Ю. Н. Колесник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006.

2. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. В. Тареев. – Л. : Энергия, 1985. – 352 с.

3. Корицкий, Ю. В. Электротехнические материалы / Ю. В. Корицкий. – М. : Энергия, 1976. – 320 с.

4. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 411 с.

Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Исследование токов утечки диэлектриков.....</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование электрической прочности воздуха в переменном электрическом поле</i>	<i>11</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование электрической прочности воздуха в постоянном электрическом поле.....</i>	<i>19</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование электрической прочности твердых диэлектриков.....</i>	<i>26</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Определение электрической прочности трансформаторного масла.....</i>	<i>32</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Определение диэлектрических параметров трансформаторного масла.....</i>	<i>40</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование тепловых характеристик электротехнических материалов</i>	<i>48</i>
<i>Литература</i>	<i>57</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Зализный Дмитрий Иванович
Мороз Денис Равильевич

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *А. Д. Федорова*
Компьютерная верстка *М. В. Кравцова*

Подписано в печать 19.09.12.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,65.

Изд. № 26.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр Учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48