

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 5 глав, написанных в 106 страницах текстового материала, 35 рисунка, 4 таблиц, 50 использованных источников, 1 приложение.

Перечень ключевых слов: пробой, старение, полиимид.

Объектом исследования является теплостойкий монтажный провод марки МС 26 – 15, предназначенный для внутриблочных и межблочных соединений электрических приборов и аппаратов в авиастроении.

Работа состоит из 5 глав. В первой главе рассмотрен литературный обзор экспериментальных данных по вопросу исследование времени до пробоя полимерных диэлектриков. Рассмотрены существующие теоретические представления о механизме и закономерностях изменения времени до пробоя от влияния различных факторов.

Во второй главе (методическая часть) сделан выбор испытательной установки и методика проведения испытаний.

В третьей главе (экспериментальная часть) дается описание полученных экспериментальных результатов, проводится их анализ и обработка на основе существующих теорий.

В четвертой главе рассмотрен финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение исследования.

В пятой главе рассмотрена социальная ответственность по выполнению данного исследования.

В результате исследования были получены зависимости времени до пробоя от температуры и напряженности приложенного электрического поля для монтажных проводов с полиимидной изоляцией. На основании полученных данных были сделаны выводы о стойкости полиимидной изоляции.

Область применения: используется в электродвигателях и аппаратах, работающих при повышенных температурах.

Экономическая эффективность/значимость работы – оценка надежности (прочности) полиимидной изоляции.

Содержание

Введение.....	4
1. Литературный обзор.....	5
1.1. Общие понятия о пробое.....	5
1.2. Процессы старения полимерных диэлектриков.....	11
1.3. Влияние частичных разрядов на старение полимерных диэлектриков.....	13
1.4. Теоретические представления.....	19
1.4.1. Основные эмпирические уравнения.....	19
1.4.2. Оценка времени до пробоя с позиции термофлуктуационной теории.....	21
2. Методическая часть.....	26
2.1. Основные методы проведения испытаний.....	26
2.1.1. Измерение $U_{пр}$ на постоянном токе.....	26
2.1.2. Измерение $U_{пр}$ на переменном токе частотой 50 ГЦ.....	27
2.2. Выбор формы образцов и электродов.....	28
2.3. Выбор методики проведения испытаний.....	31
2.3.1. Экспериментальная установка, описание и порядок работы на установке.....	31
2.3.2. Порядок работы на установке.....	31
2.4. Меры по технике безопасности.....	33
2.5. Подготовка образцов проводов.....	34
2.5.1 Для испытаний на определение кратковременного пробивного напряжения.....	35
2.5.2 Для испытаний на пробой.....	36
2.6. Анализ погрешностей при проведении испытаний.....	37
2.6.1. Ошибка экспериментов.....	38
3. Экспериментальная часть.....	38
3.1. Сведения по объекту исследования.....	39
3.2. Определение кратковременного пробивного напряжения.....	41

3.3. Описание экспериментальных результатов при исследовании зависимости времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля.....	44
3.4. Анализ и обсуждение экспериментальных данных.....	48
3.5. Оценка возможности использования термофлуктуационной теории для анализа полученных данных.....	49
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	71
5. Социальная ответственность.....	85
Заключение.....	101
Список литературы.....	102
Приложение.....	106

Введение

Актуальность работы. В настоящее время в энергетике и электротехнической промышленности все более жесткие требования предъявляются к электротехническим конструкциям с точки зрения их надежности и долговечности. Надежность электротехнических конструкций зависит не только от условий эксплуатации, но и от качества применяемых электроизоляционных материалов и обеспечения необходимых технологических процессов при их производстве.

В области кабельной техники особенное внимание уделяется требованиям, предъявляемым к изоляции кабелей и проводов, работающих при повышенных температурах. Это касается кабелей и проводов, применяемых в нефтяной и газовой промышленности, самолетостроении. В этих конструкциях в последние годы используются материалы с повышенной нагревостойкостью, к которым относятся блоксополимеры этилена с пропиленом, полиимидные и другие полимерные диэлектрики. К сожалению, в литературе недостаточно имеется данных для анализа закономерностей изменения их пробивного напряжения и времени до пробоя, чтобы можно было прогнозировать длительность их работы при воздействии повышенных температур, повышенных механических и электрических нагрузок, действия агрессивных сред и радиации. Поэтому изучение закономерностей процесса старения этих материалов при воздействии повышенных температур и высокой напряженности поля является актуальным, что послужило основой при постановке данной работы.

Целью данной работы является исследование влияния температуры и напряженности электрического поля на время до пробоя монтажных проводов с полиимидной изоляцией.

Провода характеризуются устойчивостью к повышенным температурам и воздействию радиации.

1 Литературный обзор

Большинство современных электротехнических конструкций имеют в качестве основной изоляции твердые электроизоляционные материалы. Опыт эксплуатации электротехнических конструкций показывает, что основной причиной их отказа является пробой изоляции. Механизм пробоя, его причины многообразны и во многом зависят от условий эксплуатации, качества самих электроизоляционных материалов и других факторов, к которым относятся вид напряжения, его частота, степень неоднородности электрического поля и другие.

В электрических аппаратах, пробой диэлектрика, как принято, вызывает аварийное состояние, и очень важно сконструировать электрический аппарат так, чтобы он имел минимальные размеры и при воздействии рабочего напряжения не пробивался в течение всего времени эксплуатации.

В связи с этим изучение механизма пробоя твердых диэлектриков, основных закономерностей его развития представляет большой практический интерес с точки зрения правильности выбора рабочих напряженностей электрического поля и прогнозирования надежности электроизоляционных конструкций.

1.1 Общие понятия о пробое.

Согласно ГОСТ 21515-76, пробой – это явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля [1].

Приложенное к диэлектрику минимальное электрическое напряжение, приводящее к пробую, называется пробивным и обозначается $U_{пр}$. Значение пробивного напряжения зависит от толщины диэлектрика d и формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и однородностью самого диэлектрика. Для сравнения свойств различных материалов более удобной характеристикой является электрическая прочность.

Минимальную напряженность однородного электрического поля, приводящую к пробое, называют электрической прочностью.

В однородном электрическом поле она равна:

$$E_{np} = U_{np} / d,$$

где d -толщина диэлектрика в месте пробоя.

В случае неоднородного электрического поля и материала самого диэлектрика величина напряженности электрического поля, как правило, возрастает, что необходимо учитывать при проведении исследований.

Механизм разрушения диэлектрика под действием электрического поля достаточно сложен и многообразен и может протекать по-разному, в зависимости от температуры, вида воздействующего напряжения, времени его приложения, типа диэлектрика, его структуры и др. условий испытания. Это в частности, может быть развитие ударной ионизации, нарушение тепловой устойчивости и перегрев диэлектрика за счет высоких диэлектрических потерь или процессы электрохимического старения при длительном воздействии электрического поля (например, под действием ЧР). Можно также отметить, что пробой диэлектрика представляет собой сочетание многих физических процессов электрических, тепловых, электромеханических, развитие которых определяет его механизм.

В настоящее время различают следующие основные виды пробоя:

- электрический пробой;
- тепловой пробой;
- электрохимический пробой (электрическое старение).

Рассмотрим кратко основные закономерности каждой формы пробоя

Электрический пробой, как правило, наблюдается в том случае, когда устранена возможность развития теплового пробоя и когда мала длительность воздействия приложенного напряжения. Это возможно при испытании диэлектриков малых толщин при относительно низких температурах и на импульсном напряжении.

Для обеспечения указанных условий необходимо, чтобы испытуемый диэлектрик обладал химической стабильностью, малой проводимостью, малым значением $\text{tg}\delta$ и, кроме того, хорошей теплопроводностью [Похолков, Меркулов, Петров].

Чаще всего электрический пробой твердых диэлектриков наблюдается при низких температурах и на импульсном напряжении, т.е. при малой длительности приложенного напряжения. Для электрической формы пробоя твердых диэлектриков характерны более слабая зависимость их электрической прочности от температуры, толщины образца и времени приложенного напряжения (при $\tau \geq 10^{-7} - 10^{-8}$ с) чем при тепловом пробое (см. рис. 1.1) [8].

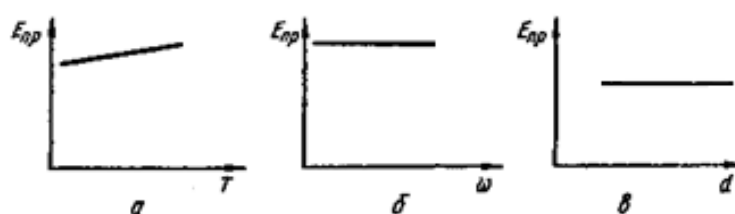


Рисунок 1.1 – Основные характеристики электрического пробоя

Опираясь на современные теоритические представления об электрическом пробое, можно сказать, что процесс электрического пробоя твердых диэлектриков в основном обусловлен электрическими процессами, связанными с развитием ударной ионизации.

Тепловой пробой в диэлектриках возникает, как правило, вследствие нарушения теплового равновесия между процессами тепловыделения и

теплоотдачи.

Наличие диэлектрических (в переменном поле) или джоулевых (в постоянном) потерь приводит к выделению тепла и разогреву диэлектрика. Если диэлектрические потери и удельная проводимость диэлектрика возрастают с повышением температуры, а теплоотвод недостаточен, то может происходить нарушение тепловой устойчивости, в результате которого происходит дальнейшее повышение температуры и разрушение диэлектрика в виде образования проплавленного канала пробоя.

Отличительными признаками электротеплового пробоя диэлектриков является сильная зависимость электрической прочности от толщины образцов d (ухудшение теплоотвода), температуры окружающей среды T и частоты электрического поля (рисунок 1.2).

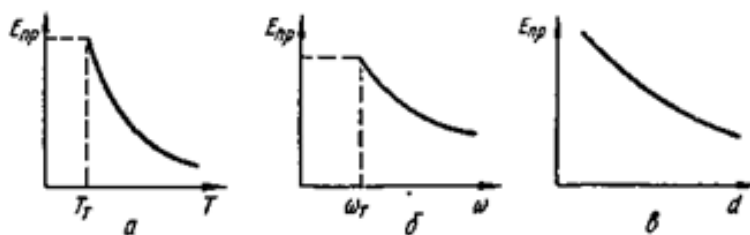


Рисунок 1.2 – Основные характеристики электротеплового формы пробоя на 2 – ом участке при повышенных температурах и частотах.

Критерием теплового пробоя служит нарушение равновесия между выделяемым в диэлектрике - $Q_{\text{выд}}$ и отводимым количеством тепла - $Q_{\text{отв}}$.

Согласно теоретическим представлениям, рассмотренным в теориях Вагнера, а также Фока и Семенова, мощность, выделяемая в диэлектрике за счет диэлектрических потерь на переменном напряжении равна:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.1)$$

где U — приложенное к диэлектрику напряжение,

ω — частота изменения напряжения,

C — электрическая емкость диэлектрика,

$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Процесс теплопередачи (теплоотвода) выражается с помощью формулы Ньютона:

$$Q_{\text{отв}} = \sigma \cdot S \cdot (T - T_0), \quad (1.2)$$

где σ — коэффициент теплоотдачи, S — площадь поверхности диэлектрика, T — температура поверхности диэлектрика, T_0 — температура окружающей среды.

Можно рассчитать величину пробивного напряжения из условия теплового равновесия

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T - T_0)}{0,24 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta_0 \cdot e^{\alpha(T - T_0)}}}, \quad (1.3)$$

где σ — коэффициент теплоотдачи, Вт/град.м²;

S — площадь диэлектрика, через которую рассеивается тепло, м²;

$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь при температуре окружающей среды T_0 ;

T — температура диэлектрика в канале пробоя;

α — температурный коэффициент.

Электрохимический пробой, как правило, возникает при длительном воздействии приложенного напряжения, а также за счет различных электрохимических процессов, которые приводят к снижению его пробивного напряжения и вызывают ухудшение диэлектрических свойств (повышение электропроводности, увеличение диэлектрических потерь и

снижение прочности). При этом снижение пробивного напряжения или электрической прочности будет тем больше, чем больше время воздействия приложенного напряжения.

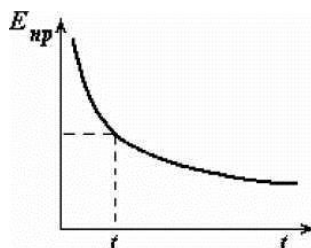


Рисунок 1.3 – Кривая жизни изоляции

Такая зависимость $E_{пр} = f(t)$ получила в литературе название «кривой жизни» (см. рис.1.3). Т.е. зависимость электрических свойств от времени называется кривой жизни диэлектрика, само явление получило название электрохимического пробоя или электрического старения.

Сущность процесса электрического старения заключается в возникновении и развитии в диэлектрике различных физико–химических процессов, вызванных воздействием электрического поля и приводящих к ухудшению его диэлектрических свойств.

В результате электрохимических процессов, происшедших в диэлектрике под воздействием электрического поля (от нескольких минут до нескольких лет), возрастает его проводимость, увеличиваются диэлектрические потери, снижается кратковременная электрическая прочность. Это разрушение диэлектрика можно рассматривать как самостоятельную форму пробоя, которая в завершающей стадии, как правило, имеет тепловой характер, т.е. завершается развитием теплового пробоя.

Установлено, что скорость электрического старения, механизм электрохимических процессов зависят как от условий испытания (действия агрессивных сред и радиации), так и от вида материала диэлектрика. Рассмотрим отдельно процессы старения и влияние частичных разрядов на

старение полимерных диэлектриков.

1.2 Процессы старения в полимерных диэлектриках

В данной работе мы берем полимерные диэлектрики, потому что в настоящее время в качестве изоляции большинства электротехнических конструкций используются полимерные диэлектрики. Поэтому наибольший интерес представляет именно рассмотрение процессов старения в полимерах. Преобладающий механизм электрического старения полимеров зависит от строения полимера, химического состава, а также от геометрических размеров и формы образцов и изделий, применяющихся в качестве электрической изоляции.

Старение органических (полимерных) диэлектриков развивается наиболее быстро (наименьшие значения τ) в переменном электрическом поле, когда имеются достаточно интенсивные частичные разряды.

Характер зависимости τ от E не дает достаточных оснований для суждений о механизме электрического старения того или иного диэлектрика. Существенным недостатком при использовании данных зависимостей является то, что на основании их можно получить неправильный вид эмпирического соотношения, характеризующего зависимость τ от E . Кроме того, по графику $\tau = \tau(E)$ иногда можно определить ошибочное значение напряженности начала ионизации $E_{и}$, ниже которого старение не должно развиваться. Поэтому для объективной оценки старения полимерных диэлектриков лучше пользоваться зависимостью времени жизни от температуры при $E = \text{const}$. Известно, что для многих физических величин существует экспоненциальная зависимость $\tau = \tau(T)$. Поэтому важно было проверить, можно ли зависимость $\tau = \tau(T)$ выразить с помощью эмпирического соотношения:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1.4)$$

где: τ_0 – предэкспоненциальный множитель; ΔW – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура, $^{\circ}\text{K}$.

Результаты испытаний для ряда диэлектриков представлены на рисунок 1.4

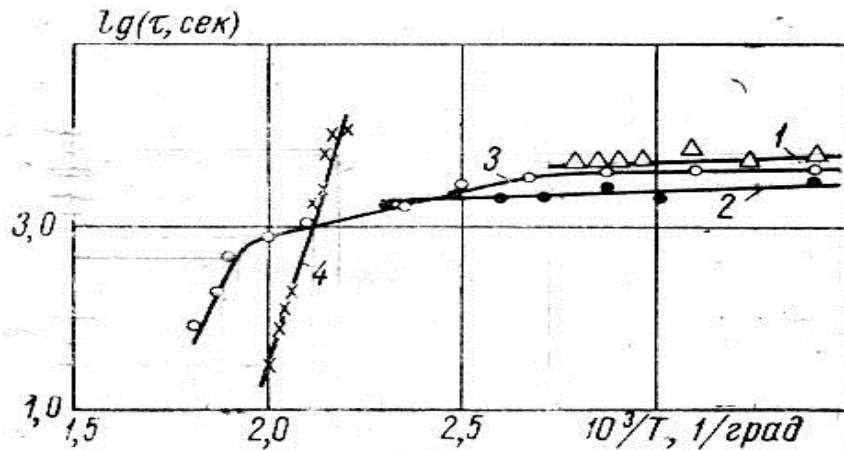


Рисунок 1.4 – Зависимости $\lg \tau = \tau(1/T)$ для полимерных пленок ПС (1), ПЭТФ (2) и ПТФЭ (3) в переменном поле $f = 50$ Гц, а также для пленки ПТФЭ в постоянном поле в вакууме (4).

Из рисунке 1.4 видно, что время жизни пленочных полимерных диэлектриков в переменном поле почти не зависит от температуры: для ПТФЭ в интервале от 20 до 100°C , а для ПС ПЭТФ – во всём допустимом для них интервале рабочих температур.

Итак, приведенные результаты позволяют установить основные закономерности электрического старения диэлектриков и высказать предположение о причинах старения: электрическом поле для полимерных диэлектриков наблюдается степенная зависимость $\tau = \tau(E)$ при $\alpha = \text{const}$, и в значительном интервале α время жизни почти не зависит от температуры при $E = \text{const}$.

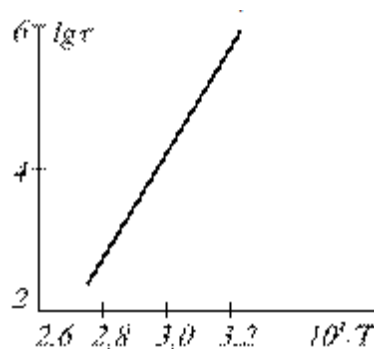


Рисунок 1.5 – Зависимость долговечности от температуры – полиэтилен в условиях дробных разрядов при переменном напряжении частот 50Гц.

Судя по закономерностям, поскольку, напряжение переменное, то основным из всех возможных механизмов старения наибольший интерес представляет именно вопрос старения материалов при воздействии ЧР.

Основной причиной старения полимерных диэлектриков в переменном поле являются частичные разряды, возникающие в воздушных включениях. Более интенсивное старение в интервале напряженностей поля $E > E^*$, чем при $E < E^*$, вероятно, обусловлено разогревом полимеров до $\alpha > \alpha_{кр}$ за счет энергии частичных разрядов.

1.3 Влияние частичных разрядов на старение полимерных диэлектриков

Экспериментально показано, что основной причиной старения органической изоляции в сильном электрическом поле являются частичные разряды, происходящие в газовых порах, имеющихся в изоляции, и в окружающем изоляцию газе. Доказательством этого являются следующие факты:

1. Резкое возрастание времени жизни изоляции при проведении ее испытаний в вакууме, где развитие частичных разрядов затруднено.
2. Резкое возрастание времени жизни изоляции при напряженностях поля, меньшей напряженности возникновения частичных разрядов.

3. Резкое уменьшение времени жизни изоляции при увеличении частоты приложенного электрического поля за счет роста интенсивности частичных разрядов.

Возникновение частичных разрядов, как правило, связано с наличием в органических диэлектриках воздушных включений, которые образуются при их изготовлении, за счет усадки в процессе полимеризации и многих других причин. Под действием частичных разрядов (ЧР) могут происходить следующие процессы:

1. Образование газообразных продуктов ионизации – озона, окислов углерода, окислов азота, паров воды и др.

2. Химическое разрушение диэлектрика под действием продуктов ионизации, сопровождаемое разрывом химических связей, образованием свободных радикалов, появлением поперечных связей (сшиванием) между макромолекулами, образованием новых групп (карбоксильные, эфирные) в составе макромолекул полимера, а также углерода и др. Эти изменения прослеживаются с помощью ИК – спектроскопии.

3. Непосредственное воздействие на диэлектрик бомбардировки ионами и электронами, действие излучения, образуемыми при ЧР.

5. Повышение локальной напряженности электрического поля и температуры, возникающие в зоне ЧР.

6. Эрозия диэлектрика, ведущая к уменьшению его веса и толщины.

Механизм электрохимических процессов, приводящих к электрическому старению, многообразен и зависит от материала диэлектрика, однако можно указать следующие основные закономерности:

а) образование химически активных продуктов при ионной про-

водимости (взаимодействие ионов с металлом электродов, развитие дендритов);

б) процессы электролиза и электролитического разложения продуктов загрязнения, воды, пропиточной массы (взаимодействие их с материалом электродов и диэлектрика);

в) разрыв химических связей, образование свободных радикалов и их последующее взаимодействие с основным диэлектриком;

г) образование поперечных химических связей, повышение молекулярного веса.

Указанные факторы вызывают изменение свойств диэлектрика, определяют механизм его старения и приводят к снижению мгновенного пробивного напряжения. Роль тех или иных факторов может быть различным в каждом конкретном случае в зависимости от вида диэлектрика и условий испытания.

Измерив, количество разрядов и объем разрушенной части образца полиэтилена с искусственной порой, Мейсон подсчитал, что в среднем каждый единичный разряд разрушает 10^{-5} см³ полиэтилена. При непосредственном действии разрядов происходит достаточно резкое снижение с течением времени пробивного напряжения, толщины и массы пленок (рисунок 6). Следовательно, эрозия пленок считается основной причиной снижения кратковременного пробивного напряжения. При косвенном действии вне зоны разрядов толщина и масса пленок практически не изменяются, а пробивное напряжение снижается менее значительно, чем при непосредственном действии разрядов (см. рис.1.6).

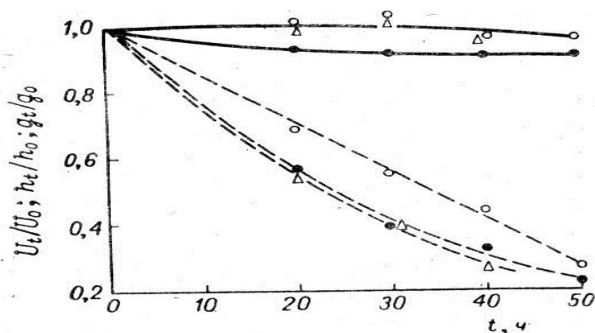


Рисунок 1.6 – Относительные изменения пробивного напряжения (•), массы (Δ) и толщины (○) со временем старения для пленки полиэтилентерфталата при напряжении 12 кВ.

Слабое снижение пробивного напряжения, очевидно, связано с уменьшением электрической прочности пленки в результате реакций с озоном и окислами азота. Действие одних только продуктов разряда (озона и окислов азота) недостаточно для интенсивного изменения пробивного напряжения и не приводит к эрозии – к уменьшению толщины и массы пленок.

Прямые доказательства роли частичных разрядов при электрическом старении полимерных плёнок в переменном поле удалось получить в результате проведения испытаний на старение в различных условиях. Во-первых, было показано, исключение частичных разрядов путём помещения исследуемых образцов в вакуум при $\alpha=20^{\circ}\text{C}$ приводит к чрезвычайно резкому возрастанию времени жизни τ по сравнению со значениями, полученными при испытаниях в воздухе, т.е. при наличии достаточно интенсивных частичных разрядов (рис.1.7).

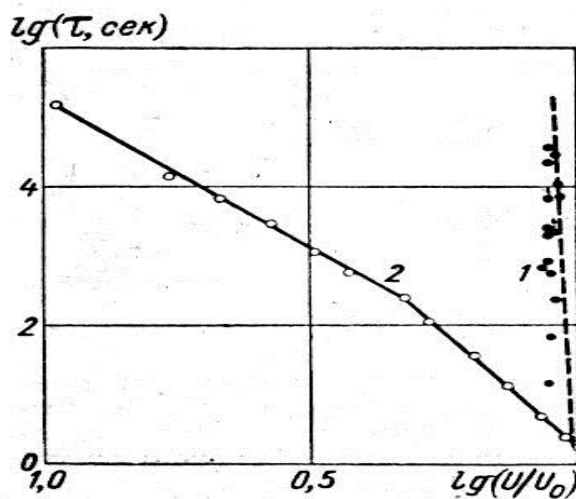


Рисунок 1.7 – Сравнение зависимостей $\lg \tau = f(\lg U/U_0)$, полученных для пленки ПТФЭ в вакууме (1) и при атмосферном давлении (2) в переменном поле $f=50\text{Гц}$, $\alpha=20^\circ\text{C}$.

Во – вторых, исключение частичных разрядов путем снижения напряженности поля до значения $E=E_{\text{и}}$ также приводит к исключительно резкому возрастанию τ по сравнению с теми значениями τ , которые соответствовали бы продолжению отрезка прямой линии, изображающей зависимость $\lg \tau = f(\lg E)$.

Этот эффект удалось особенно отчетливо наблюдать при испытаниях на высокой частоте (рис. 1.8, 1.9). В-третьих, увеличение частоты следования разрядов n путем повышения частоты f испытательного напряжения приводит к обратно пропорциональному уменьшению времени жизни τ в интервале $E_{\text{и}} < E < E^*$.

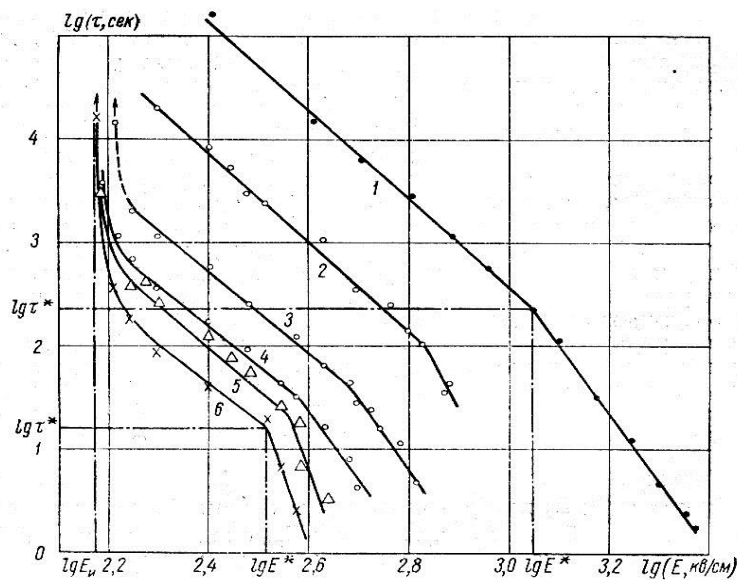


Рисунок 1.8 – Зависимости $\lg \tau = \tau(\lg E)$ для пленок ПТФЭ в переменном поле частотой 50 Гц (1), 900 Гц (2), 16 кГц (3), 50 кГц (4), 104 кГц (5), 240 кГц (6).

Для более обстоятельного исследования роли разрядов в процессе электрического старения полимерных пленок в переменном поле необходимо сопоставить между собой зависимости частоты следования разрядов n и времени жизни τ от напряженности поля и температуры.

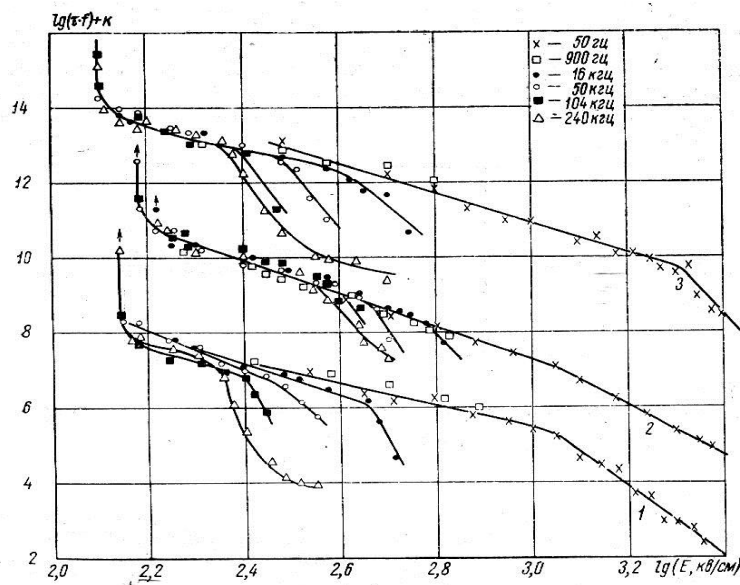


Рисунок 1.9 – Зависимости $\lg(\tau f) + K = \varphi(\lg E)$ для пленок ПС, $K=0$ (1), ПТФЭ, $K=3$ (2), ПЭТФ, $K=6$ (3) при различных частотах переменного поля.

Согласно простейшей теории разрядов в газовых прослойках, в

переменном электрическом поле частота разрядов n не должна существенно зависеть от α . Экспериментальной проверкой установлено, что действительно показания индикатора частичных разрядов не зависят от температуры испытуемой пленки ПТФЭ в интервале от 25 до 250⁰С. С другой стороны, как видно из рисунка 1.8, время жизни полимерных диэлектриков при заданном значении E также почти не зависит от температуры у ПТФЭ – в интервале температур от 20 до 100⁰С, а у ПС и ПЭТФ – вплоть до значений α , при которых происходит изменение физических свойств пленки только за счет действия повышенной температуры. Неизменность характеристик разрядов и времени жизни полимерных плёнок при изменении температуры ещё раз подтверждает, что старение плёнок в пределах отмеченного интервала α в переменном поле действительно обусловлено частичными разрядами.

1.4 Теоретические представления.

1.4.1 Основные эмпирические уравнения

На практике, чтобы описать процессы старения диэлектриков и нахождения времени до пробоя часто используются эмпирические уравнения:

- уравнение экспоненциального вида:

$$\tau_{\text{пр}} = B \cdot e^{-bE}, \quad (1.5)$$

где B, b – коэффициенты, отражающие условия эксперимента.

- уравнение степенного вида:

$$\tau_{\text{пр}} = A \cdot E^{-n}, \quad (1.6)$$

где A, n – постоянные, зависящие от материала диэлектрика.

- уравнение комбинированного вида:

$$\tau_{\text{пр}} = CU^{-n} \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1.7)$$

Здесь C , n – константы,

ΔW – высота потенциального барьера,

T – температура, К,

k – постоянная Больцмана.

При электрохимическом пробое снижение E_{np} с течением времени описывается эмпирическими выражениями степенного вида (формула 1.8):

$$E_{np} = A \cdot \tau^{-n}, \quad (1.8)$$

$$E_{np} = \frac{A_1}{m\sqrt[n]{\tau}}, \text{ или } \tau = \frac{A_2}{E^m}, \tau_{np} = A \cdot E^{-n} \quad (1.9)$$

где $n = \frac{1}{m}$.

Здесь A и m – постоянные, зависящие от материала диэлектрика (для бумажно-масляной изоляции $m = 7 \div 8$).

Зависимость времени жизни $\tau = f(T)$ от температуры обычно описывается уравнением вида

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1.10)$$

где ΔW – энергия активации.

Как уже отмечалось, влияние температуры на скорость старения выражается ростом электропроводности, что приводит к увеличению скорости процессов, определяющих периодичность следования частичных разрядов.

1.4.2 Оценка времени до пробоя с позиции термофлуктуационной теории.

К недостаткам данных уравнений относится необходимость определения параметров в каждом случае (т.е. как только мы изменим температуру, напряженность и т.п., то приходится снова определять параметры), что неудобно для их использования.

В работах [3 – 5] показано, что для объяснения закономерностей разрушения полимерных материалов под действием различных нагрузок может быть использована термофлуктуационная теория, разработанная академиком С.Н. Журковым в 1967 г. [6].

Согласно кинетической термофлуктуационной теории С.Н. Журкова, разрушение материала происходит из-за разрыва химических связей, который вызывается совместным действием энергии теплового движения молекул и какой-то внешней силы (механической нагрузки, напряженности электрического поля и др.). Непосредственно разрыв химической связи, ослабленной действием внешних нагрузок, происходит благодаря флуктуации кинетической энергии теплового колебательного движения атомов или молекул.

Непосредственно теория Журкова применяется только для механического разрушения. На возможность использованной данной теории для оценки времени до пробоя диэлектриков используется термофлуктуационная теория, В.С. Дмитриевского

Известно, что взаимодействие атомов друг с другом может быть описана графиком:

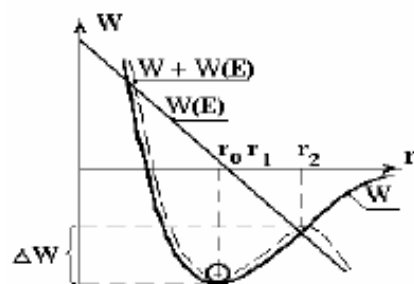


Рисунок 1.10 – Зависимость энергии взаимодействия атомов от расстояния между электродами

Здесь W – энергия взаимодействия атомов;

$(r_0=r_1)$ – расстояние между атомами, соответствующее минимуму потенциальной энергии, где силы взаимодействия (притяжения и отталкивания) равны;

ΔW – высота потенциального барьера, который необходимо преодолеть атому при разрыве химической связи с учетом воздействия нагрузки E .

За счет воздействия внешнего поля E кривая энергии взаимодействия искажается и приобретает вид кривой $[W + W_1(E)]$. При этом высота потенциального барьера уменьшается.

Если учесть воздействие окружающих атомов, то высота потенциального барьера будет еще ниже. Следует отметить, что в любом случае высота этого потенциального барьера достаточно велика, чтобы атом мог получить такую энергию только от одного электрического поля. Такую энергию атом может получить только в результате тепловых колебаний (флуктуаций).

Если принять, что энергия разрыва химической связи D соответствует высоте потенциальной ямы, то

$$\Delta W = D \cdot \varphi(x), \quad (1.11)$$

где $\varphi(x)$, функция, описывающая изменение глубины потенциального барьера от величины и вида воздействующих нагрузок.

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right], \quad (1.12)$$

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{(Ae^{-bT} \beta \eta E)^2 + (\gamma \sigma)^2}, \quad (1.13)$$

Здесь: A, γ - параметры уравнения (1), определяемые экспериментально; η - коэффициент, учитывающей повышение напряженности электрического поля за счет формы электродов; β - коэффициент, учитывающий повышение напряженности электрического поля за счет неоднородности структуры материала диэлектрика; σ - механическая нагрузка, [Н/м]; E - напряженность приложенного электрического поля, [В/м]; v - коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала с температурой, $1/K^\circ$.

С точки зрения термодинамики известно, что $\tau_0 \cong 10^{-13} \text{с}$, т.е. время перехода атомов из одного равновесного состояния в другое за счет тепловых флуктуаций. Тогда частота тепловых колебаний атомов равна $1/\tau_0$.

Исходя из этого, вероятность разрыва химической связи в единицу времени равна:

$$q = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{\Delta W}{2KT}}, \quad (1.14)$$

Здесь $q^* = e^{-\frac{\Delta W}{2KT}}$ – вероятность перехода через потенциальный барьер при одном колебании.

Заменяя ΔW через энергию связи D , находим:

$$q = \frac{1}{\tau_0} e^{-\frac{D \cdot \varphi(x)}{2KT}}. \quad (1.15)$$

Условие для разрыва связи – это наступление достоверного события, тогда согласно теории вероятности – ($q - \tau = 1$), отсюда время до разрыва 1 – ой связи:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{D \cdot \varphi(x)}{2KT}}, \quad (1.16)$$

где τ_0 – постоянная времени, с; D – энергия разрыва химической связи, Дж; $\varphi(x)$ – функция от действующих нагрузок (x), вызывающих уменьшение потенциального барьера.

Из приведенного выражения видно, что время τ является функцией параметров материала, т.е. $\tau = f(E, D, T, A, \sigma, \beta, \eta, \tau_0)$, о чем говорилось в самом начале.

Вывод по 1 главе

Анализ литературных данных показывает, что разрушение полимерной изоляции зависит от многих факторов: температуры, напряженности электрического поля, агрессивной среды, действие радиации и т.д.

1. Установлено, что скорость электрического старения, механизм электрохимических процессов зависят как от условий испытания (действия агрессивных сред и радиации), так и от вида материала диэлектрика.

2. Установлено, что наибольшее влияние на изоляцию проводов оказывает температура и напряженность электрического поля, с ростом которых время до пробоя уменьшается.

3. Зависимость времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля может быть описана различными эмпирическими уравнениями, которые устанавливают только характер зависимости, но не дают объяснения причин старения. По этой причине такие уравнения не позволяют прогнозировать длительность работы проводов, при повышенных температурах.

4. Установлено, что на время жизни полимерных диэлектриков оказывает действие частичных разрядов, возникающих в воздушных включениях или порах в изоляции. Однако отсутствие корреляционной связи между сроком службы изоляции и характеристиками изоляции также не позволяет прогнозировать срок службы изоляции.

5. Установлено, что для оценки времени до пробоя диэлектриков можно использовать термофлуктуационную теорию Журкова, которая была адаптирована для объяснения процесса старения полимерных диэлектриков. В отличие от эмпирических уравнений данная теория не только описывает характер зависимостей времени до пробоя от температуры, напряженности электрического поля и действия других факторов, но и дает какой-то механизм процесса старения.

Отсутствие в литературе необходимой информации, дающей возможность оценить время до пробоя новых типов изоляции (в данном случае полиимидной изоляции монтажных проводов) от действия температуры и напряженности электрического поля, является актуальной задачей и послужило основой выбора данной темы.

В качестве задач для выяснения причин отказа такой изоляции при повышенных температурах послужили следующие:

1. Исследование изменения пробивного напряжения полиимидной изоляции после теплового старения при повышенных температурах.

2. Исследование температурной зависимости времени до пробоя такой изоляции при различных уровнях приложенного напряжения.

3. Исследование зависимости времени до пробоя от напряженности при различных температурах.

4. Оценка возможности прогнозирования процесса отказа на основе термофлуктуационной теории.

2 Методическая часть

2.1 Основные методы проведения испытаний

Для проведения испытаний на электрическую прочность могут использоваться различные методы (на постоянном, переменном и импульсном напряжении).

2.1.1 Измерение $U_{пр}$ на постоянном токе

Для испытаний диэлектриков на постоянном токе используют схему (см. рисунок 2.2), когда в цепь высокого напряжения включают дополнительно выпрямительное устройство (рисунок 2.1). Для выпрямления используются высоковольтные двухэлектродные лампы – кенотроны или полупроводниковые диоды. Конденсатор C , включенный параллельно, служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Хотя нормами допускается пульсация, не превышающая 0,05 амплитудного значения, применяемые выпрямительные схемы обеспечивают более низкий уровень пульсаций. Выпрямительное устройство ВУ может выполняться по схеме однополупериодного или двухполупериодного выпрямления, а в некоторых случаях по схеме умножения выпрямленного напряжения.

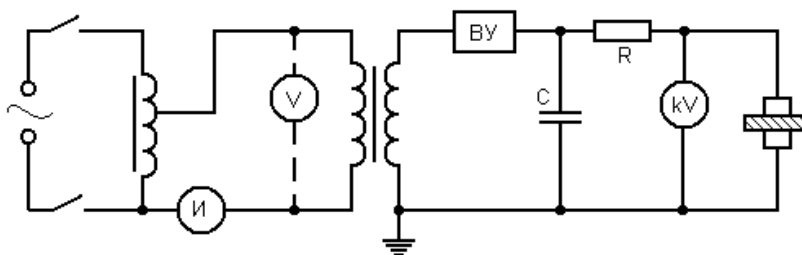


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема установки для измерения $U_{пр}$ на постоянном напряжении

Напряжение при пробое измеряют обычно на стороне высшего напряжения при помощи электростатического киловольтметра или шарового

разрядника. Напряжение можно измерять и на стороне низшего напряжения вольтметром, отградуированным по шаровому разряднику, включенному параллельно образцу. Градуировку желательно производить в установившемся режиме выпрямительной установки и при включенном образце. [6]

Для высоковольтных электротехнических конструкций, работающих на переменном напряжении, наибольший интерес представляет рассмотрение методов испытания диэлектриков на пробой на переменном напряжении, что послужило основой выбора испытательной установки.

2.1.2 Измерение $U_{пр}$ на переменном токе частотой 50 Гц.

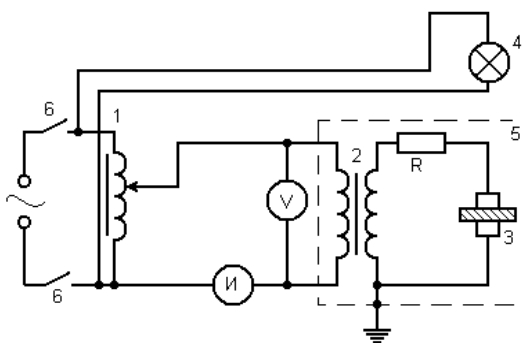


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема для измерения $U_{пр}$ при переменном напряжении

Плавное повышение напряжения при определении электрической прочности достигается с помощью устройств для регулирования напряжения, к которым предъявляется ряд требований. Источник питания установки, регулирующее устройство и трансформатор должны обеспечивать на образце синусоидальную форму кривой напряжения; коэффициент амплитуды (отношение максимального значения к действующему) испытательного напряжения должен быть в пределах 1,34—1,48. Частота должна составлять 50 Гц; допускается отклонение $\pm 0,5$ Гц. Кроме того, регулировочное устройство должно обладать достаточной мощностью, простотой и эксплуатационной надежностью.

В момент пробоя в образце протекает ток короткого замыкания, вызывающий значительную перегрузку трансформатора. Для защиты последнего в цепи низкого напряжения предусматривается автоматическое устройство, отключающее питание после пробоя. Время срабатывания такого устройства не должно превышать 0,02 с.

2.2 Выбор формы образцов и электродов

Образцы и электроды для определения U_{np} твердых материалов должны иметь размеры, при которых исключена возможность возникновения поверхностного пробоя. На поверхности образцов не должно быть трещин, сколов, вмятин, царапин и загрязнений. Для определения U_{np} используют образцы двух типов.

Определение U_{np} в направлении, перпендикулярном к поверхности или слоям (для слоистых материалов), производят на плоских, фасонных, трубчатых и ленточных образцах (рис. 2.3). Плоские образцы должны иметь диаметр 25—150 мм, для квадратных образцов эти размеры относятся к стороне квадрата. Трубчатые образцы могут иметь длину 100—300 мм. На диаметр трубки ограничений не налагается. Форма и размеры (указанные выше) оговариваются в стандарте на материал; если размер не оговаривается, то следует использовать наибольший размер. В тех случаях, когда толщина образцов не позволяет определить электрическую прочность в направлении, перпендикулярном к поверхности, применяют фасонные образцы (рис. 2.3, б и г).

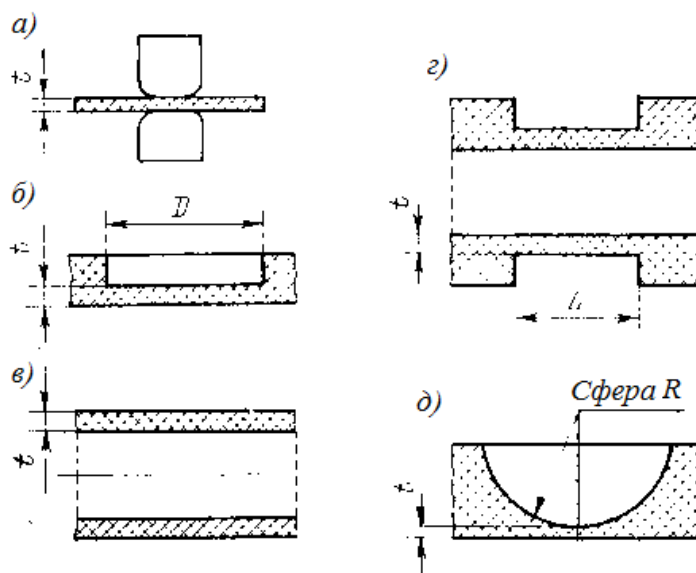


Рисунок 2.3 – Образцы твердых изоляционных материалов: *а* – плоский; *б* – плоский с цилиндрической выточкой; *в* – трубчатый; *г* – трубчатый с проточкой; *д* – плоский со сферической выточкой.

Электроды для испытаний твердых диэлектриков должны удовлетворять общим требованиям:

1. Электрод должен обладать высокой проводимостью и обеспечивать хороший электрический контакт по всей поверхности соприкосновения с образцом без воздушных прослоек между ними.
2. В условиях испытания электрод не должен влиять на испытуемый образец (деформировать его, оказывать химическое воздействие).
3. Электрод не должен изменять свою форму и размеры, а также претерпевать какие – либо физические или химические изменения в процессе испытания (плавиться, окисляться и т. п.).
4. Электрод должен быть таким, чтобы его было легко наносить и удобно применять при испытаниях.

При определении E_{np} могут применяться массивные металлические электроды, пленочные (осажденные путем распыления или вжигания) и

графитовые. Во всех случаях необходимо обеспечить хороший контакт электрода с испытуемым образцом.

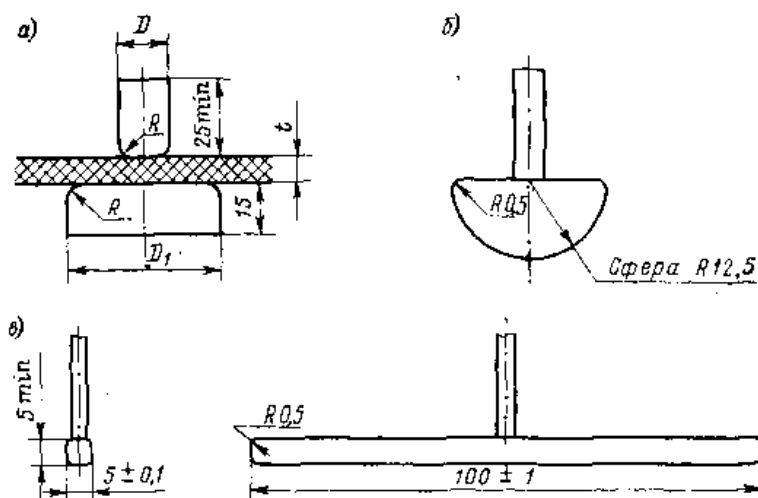


Рисунок 2.4 – Электроды: а – цилиндрические; б – полусферический; в – полосковый.

Для плоских образцов применяют два цилиндрических электрода разных диаметров с закругленными краями. Для получения поля, близкого к однородному, диаметр нижнего электрода D , должен не менее чем в три раза превышать диаметр верхнего электрода D (рис.2.4, а). Большой из электродов соединяется с заземленным выводом обмотки высокого напряжения испытательного трансформатора, а если оба конца обмотки высокого напряжения трансформатора изолированы от земли, то больший электрод присоединяется к выводу, потенциал которого ближе к потенциалу земли. Высота высоковольтного электрода также существенно сказывается на распределении поля в материале. Она должна быть не менее десятикратной толщины испытуемого материала, но не менее 25 мм. Диаметр D верхнего электрода выбирается из ряда: 10; 25; 50 мм. Могут применяться и электроды одинакового диаметра.

Для определения электрической прочности твердых диэлектриков используют образцы, обеспечивающие пробой в условиях однородного

электрического поля, чтобы устранить возможность поверхностного перекрытия и влияния других побочных эффектов. Для этого обычно используют плоские образцы с цилиндрическими закругленными электродами диаметром 5, 10, 25 мм. Габаритные размеры образцов выбираются из условия устранения возможности поверхностного разряда. Это условие может быть достигнуто также с применением электродного устройства Рижинашвили, представленного на рис.2.5.

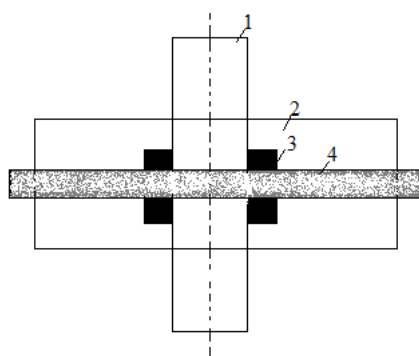


Рисунок 2.5 – Электродное устройство Рижинашвили для испытания твердых диэлектриков на пробой: 1 – электрод; 2 – пластина из оргстекла; 3 – уплотнительное кольцо из резины; 4 – испытываемый диэлектрик.

2.3 Выбор методики проведения испытаний

Как правило, в испытаниях на электрическую прочность используются установки, которые работают на переменном напряжении. Поэтому из перечня испытательных установок для проведения испытаний на пробой и испытаний на кратковременную прочность выбрана типовая промышленная пробивная установка, работающая на переменном напряжении.

2.3.1 Экспериментальная установка, описание и порядок работы на установке

Электрическая схема пробивной установки для проведения испытаний приведена на рис.2.6.

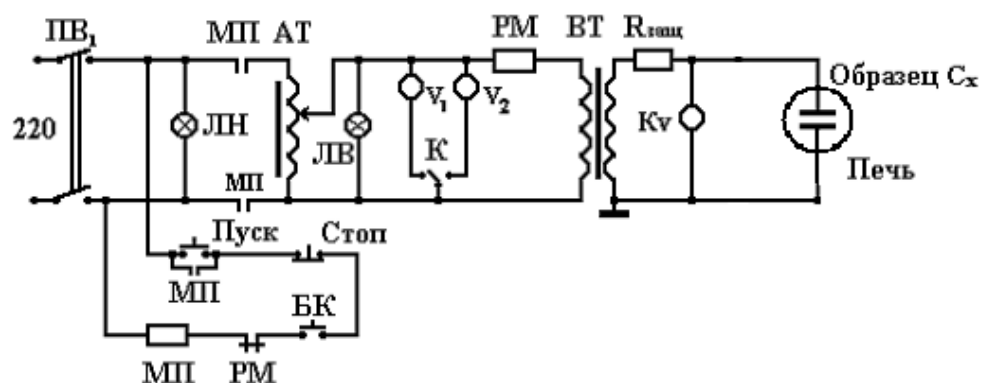


Рисунок 2.6 – Принципиальная электрическая схема установки для измерения $U_{пр}$ на переменном напряжении

$БК$ – блокировочные контакты двери;

$ПВ1$ – пакетный выключатель;

$ЛН$, $ЛВ$ – сигнальные лампы «низкого» и «высокого» напряжения;

$V1$, $V2$ – контрольные вольтметры для измерения напряжения;

$АТ$, $ВТ$ – соответственно автотрансформатор и высоковольтный трансформатор;

$R_{защ}$.- защитное (токоограничивающее) сопротивление;

$МП$ – соответственно контакты и обмотки магнитного пускателя;

$R_{макс.}$ – соответственно контакты и обмотка реле максимального тока.

$КВ$ – киловольтметр;

$С_x$ – образец (исследуемый диэлектрик);

2.3.2 Порядок работы на установке

1. Образцы проводов устанавливаются в испытательную ячейку, и помещаются в камеру тепла.

2. Задается необходимая температура в термошкафу с помощью терморегулятора. Для этого выполняются следующие операции:
3. Устанавливается режим нагрева печи и необходимая температура поочередным нажатием либо кнопки «+» либо кнопки «-», а включается поочередным нажатием сначала кнопки «Стоп», а затем «Пуск»;
4. Включается установка пакетным выключателем – ПВ1. На пульте управления должна загореться сигнальная лампа ЛН «Низкое напряжение».
5. Устанавливается положение рукоятки на «ноль».
6. Поддается высокое напряжение нажатием кнопки «Пуск». На пульте управления должна загореться сигнальная лампа ЛВ «Высокое напряжение».
7. Вращая рукоятку автотрансформатора, плавно повышается напряжение до нужного номинального напряжения.
8. При пробое, время пробоя фиксируется. После пробития всех образцов, рукоятка автотрансформатора устанавливается в исходное положение «ноль».
9. Устанавливается терморегулятором другая температура в термошкафе согласно пункту 2, а затем повторить те же операции 3-7 при каждой заданной температуре.

По окончании опыта установка выключается от сети и выключается термошкаф.

2.4 Меры по технике безопасности [5]

Использование высоковольтных установок требует строгие меры соблюдения предосторожности. Ток, протекающий через человеческий организм, который опасен для жизни, составляет всего лишь 20 мА. Поэтому во всех высоковольтных установках принимаются меры, исключаящие

возможность случайного соприкосновения лиц, находящихся около установок, испытываемыми образцами, измерительными приборами, с выводами и проводами высокого напряжения резисторами и другими элементами высоковольтных цепей.

К работе на установках высокого напряжения допускаются лишь лица, прошедшие инструктаж по мерам безопасности и сдавшие зачет.

Испытания на высоковольтных установках разрешаются проводить только в присутствии специалиста, которым является руководителем работы. До включения высокого напряжения все дверцы и ограждения должны быть плотно закрыты. Напряжение включается только с разрешения руководителя.

После подачи напряжения категорически запрещается: производить какие-либо переключения в схеме; менять или поправлять образцы. Для замены образца необходимо выключить напряжение и тщательно заземлить выводы вторичной обмотки высоковольтного трансформатора, а также конденсаторов высокого напряжения, если они имеются в схеме; для этой цели на выводы следует накинуть изолированные крюки, соединенные с заземлением установки. После замены образца или выполнения необходимых переключений с выводов снимают заземляющие крюки (штанги).

Установки высокого напряжения должны иметь предупредительные плакаты, световую сигнализацию, а также комплект изолирующих средств: резиновых коврик, резиновых перчаток и инструмента с изолированными ручками.

За соблюдение правил техники безопасности несут ответственность руководитель испытаний, технический состав лаборатории и учащиеся, выполняющие измерения на высоковольтных установках.

2.5 Подготовка образцов проводов

2.5.1 Для испытаний на определение кратковременного пробивного напряжения

Для проведения испытаний на кратковременную электрическую прочность были подготовлены 10 групп образцов проводов (по 5 образцов проводов длиной 0,5 м в каждой группе) со сплошной полиимидной изоляцией, изготовленных с токопроводящей жилой диаметром 0,57 мм, скрученной из семи медных проволок диаметром 0,20 мм. Изоляция на основе электроизоляционного лака АД-9103 с радиальной толщиной 0,1 мм.

Для создания наиболее жестких условий испытаний, имитирующих условия эксплуатации, образцы проводов предварительно навивались на стержень по ГОСТУ 14340.4 – 79, насчитывалось 10 витков с наружным диаметром 2,45 мм (рис.2.7.)

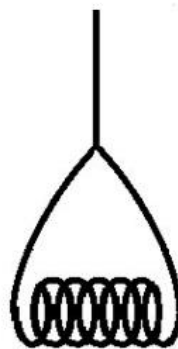


Рисунок 2.7 – Общий вид образцов для испытаний на кратковременную прочность

2.5.2 Для испытаний на пробой

Для проведения испытаний на пробой, были подготовлены 6 партий образцов проводов марки МС 26-15 (по 15, 10 образцов проводов длиной 0,4 м в каждой группе), с диаметром жилы 0,57 мм, скрученной из семи медных

проволок диаметром 0,20 мм, и изоляцией на основе электроизоляционного лака АД-9103 с радиальной толщиной 0,1 мм.

Для создания наиболее жестких условий испытаний, имитирующих условия эксплуатации, образцы провода в виде прямого отрезка длиной 0,4 м с удаленной с обоих концов изоляцией складывают пополам и скручивают на длине (125 ± 5) мм с помощью устройства, приведенного на рисунке 2.8. Концы проводов должны быть, соединены. Число скручиваний определили на основе ГОСТА Р МЭК 60 851-5-2008 для проведения испытаний на время до пробоя учитывая испытания на старение в термокамере. В нашем случае для провода с диаметром жилы 0,57 мм число кручений – 12. Петлю на конце скрученного участка образца разрезают в двух местах, чтобы обеспечить максимальное расстояние между образовавшимися концами. При раздвижении двух концов провода следует избегать резких перегибов или повреждений изоляции.

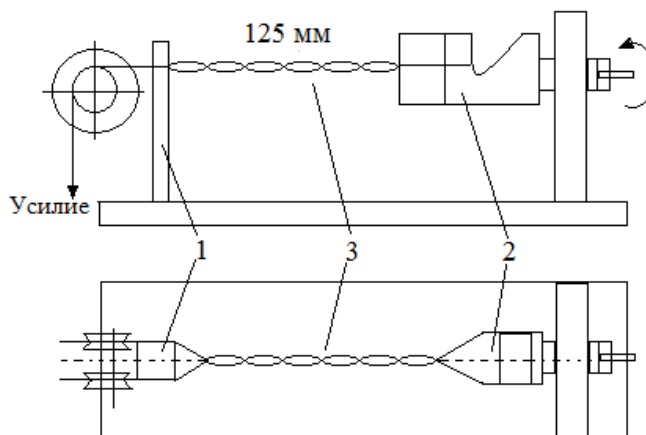


Рисунок 2.8 – Устройство для скручивания образца для испытания пробивным напряжением: 1 – неподвижная распорка; 2 – вращающийся крюк – распорка; 3 – образец.

2.6 Анализ погрешностей при проведении испытаний

В наших опытах стояла задача получить некоторые закономерности

процесса разряда, исходя из длительности приложенного напряжения, вида используемого материала и др. Для определения разрядного напряжения имеет значение не только погрешность эксперимента, но и разброс отдельных значений, который для твердых диэлектриков имеет большую величину.

Причины разброса заключаются в структурной особенности отдельных образцов, наличие слабых мест, пор, в неплотном прилегании электродов к образцу. Известно, что отклонения от идеальных условий в исследуемых образцах могут только снижать электрическую прочность. Максимальное значение электрической прочности соответствует наиболее совершенному образцу, но максимальные значения по опытным данным сильно отличаются от остальных значений.

2.6.1 Ошибки экспериментов

Рассмотрим возможные ошибки в наших экспериментах.

Измерение толщины изоляции происходит с помощью толщиномера ИЗВ – 2 с точностью до 0,1 мкм, поэтому относительная ошибка при измерении радиуса $\Delta_1=1\%$.

Напряжение, подаваемое на образец, измерялось с помощью киловольтметра С – 96. Погрешность измерения складывается из:

1. погрешности прибора;
2. визуальная ошибка измерения.

Класс точности киловольтметра марки С – 96 1,5% (по техническим данным прибора) $\Delta_2=1,5\%$.

Визуальная ошибка измерения по шкале прибора 0,5 кВ

$$\Delta_3 = \frac{0,5}{15} \cdot 100\% = 0,3\% \quad (2.1)$$

Межэлектродное расстояние измерялось также с помощью горизонтального компаратора ИЗВ – 2 с точностью до 0,1 мкм. Относительная ошибка при измерении расстояния равна $\Delta_3=1\%$.

3 Экспериментальная часть

3.1 Сведения по объекту исследования

Объектом исследования является монтажный терлостойкий провод марки МС 26-15.

Монтажный провод марки МС 26-15 со сплошной полиимидной изоляцией на максимальную температуру 200°C, с токопроводящей жилой нормальной механической прочности. Состоит из 7 медных проволок сечением 0,20 мм².

Следует отметить, что полиимиды – новый класс термостойких полимеров, содержащих в полимерных цепях циклические имидные группы. Впервые синтез полиимидов был осуществлен Боджертом и Реншоу [40], которые наблюдали, что при нагревании 4-аминофталевого ангидрида или 4-аминодиметилфталата происходит выделение соответственно воды или спирта и образование полиимида:

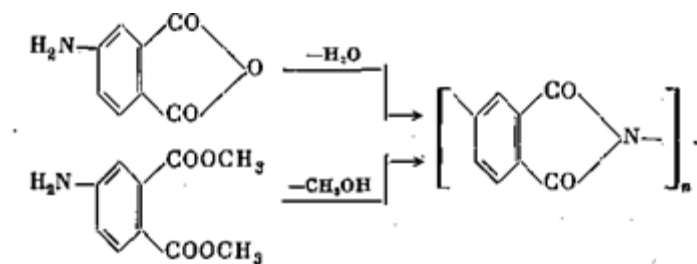


Рисунок 3.1 – Получение полиимида

Полиимиды (ПИ) обладают выдающимся комплексом свойств: высокой термической, криогенной, радиационной стойкостью, огнестойкостью, прочностными показателями в большом температурном диапазоне.

Полиимид является эластичным материалом, выдерживающим высокие температуры [3].

Основные требования к полиимидной изоляции, вытекающие из условий производства и эксплуатации, предъявляются по механической прочности на разрыв, эластичности, сопротивлению истиранию и продавливанию сосредоточенными нагрузками, по электрическому сопротивлению непрочности. Особенно высоки в настоящее время требования к эмалевой изоляции по теплостойкости и термостабильности. Это вытекает из необходимости применения электротехнических устройств в высокотемпературных конструкциях, а также в связи со стремлением повысить их надежность при перегрузках и удельную мощность. Применение для этих целей полиимидов резко увеличивает возможности органической эмалевой изоляции.

Использование полиимидных материалов для изоляции электрических машин может резко поднять надежность последних при перегрузках и перегревах, увеличить удельную мощность (в 1,5—2 раза [4]), обеспечить работоспособность в особо тяжелых условиях (например, одновременно при высокой температуре и облучении), резко увеличить сроки службы, значительно уменьшить расход черного и цветного металлов. Это, естественно, относится и к любым другим видам электротехнических устройств, где применение полиимидов возможно и целесообразно.

3.2 Определение кратковременного пробивного напряжения

Перед тем как приступить к испытаниям на время до пробоя, нам нужно определить кратковременное пробивное напряжение при котором в дальнейшем будут испытываться наши образцы.

Для оценки кратковременного пробивного напряжения, образцы испытываются на пробивное напряжение при переменном токе частоты 50 Гц в воде, на высоковольтной установке, приведенной на рис.2.6 в соответствии с ГОСТ 2990-78.

Испытываются 10 групп образцов проводов по 5 образцов в каждой группе. Для создания наиболее жестких условий испытаний, имитирующих условия эксплуатации, образцы проводов предварительно навитые помещались в камеру тепла и выдерживались при температуре 250°С.

Выем групп образцов был через каждые двое суток, после чего проводились испытания на определение кратковременного пробивного напряжения (рис.3.2).

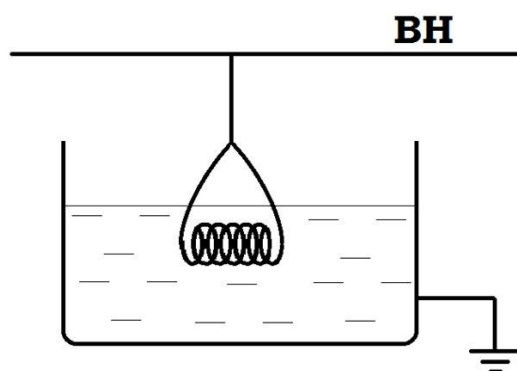


Рисунок 3.2 – Определение кратковременного пробивного напряжения изоляции образцов проводов после воздействия повышенных температур

Результаты испытаний на пробивное напряжение образцов проводов со сплошной полиимидной изоляцией приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний на пробивное напряжение в исходном состоянии и после воздействия температуры 250 °С

Т, °С	п, кол-во образцов	t, ч	Пробивное напряжение полиимидной изоляции (среднее значение), кВ
В исх. сост.	5	0	14,8
250	5	72	13,4
	5	96	14,2
	5	144	12,6
	5	240	11,8
	5	288	12,7
	5	336	12,5
	5	482	11,6
	5	578	11

	5	674	11,3
Средняя:			12.3

Полученные результаты по изменению пробивного напряжения образцов проводов со сплошной полиимидной изоляцией позволяют определить среднее кратковременное пробивное напряжение, равное 12,3 кВ.

Таким образом, выбор испытательного напряжения рассчитали

С вероятностью 90 %: $12,3 * 0,9 = 11,7$ кВ;

С вероятностью 80 %: $12,3 * 0,8 = 9,84$ кВ;

С вероятностью 70 %: $12,3 * 0,7 = 8,68$ кВ;

С вероятностью 60 %: $12,3 * 0,6 = 7,38$ кВ.

В результате для удобства проведения испытаний на длительную прочность берем величины испытательного напряжения 9 и 7 кВ, соответствующие вероятностям 80 и 60%.

3.3 Описание экспериментальных результатов при исследовании зависимости времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля

На основании предыдущей части 3.2. выбрали уровень испытательного напряжения – 9, 7 кВ и выбраны температуры, для проведения испытаний: 80, 100, 120, 140, 150 °С.

Для испытаний было изготовлено несколько партий образцов по 30 штук в каждой партии в виде скруток (рис.2.8) по ГОСТУ Р МЭК 60 851-5-2008. Перед началом испытаний и после пробоя у образцов измерялась емкость и $\text{tg}\delta$ с помощью моста на частоте 1000 Гц.

После этого образцы первой партии по 6 шт. закладываются в термокамеру, как показано на рис. 3.3. С помощью терморегулятора задается нужная нам

температура старения и подается испытательное напряжение (рис.2.6). После того, как наступает пробой, время фиксируется счетчиком времени.



Рисунок 3.3 – Общий вид образцов помещенных в термокамеру

Следует отметить, что каждая последующая партия образцов закладывается при другой температуре, чтобы в конечном итоге оценить влияние температур на время до пробоя.

Результаты испытаний приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний на время до пробоя

Испытательное напряжение U, кВ	9 кВ					7 кВ
Температура старения, °С	80	100	120	140	150	100
t, с	11,6·10 ³	8,1·10 ³	8,5·10 ³	4,3·10 ³	6·10 ³	21,8·10 ³
	11,8·10 ³	9,8·10 ³	12,9·10 ³	6,1·10 ³	7,3·10 ³	24,9·10 ³
	12·10 ³	10,9·10 ³	13,1·10 ³	7,2·10 ³	9,9·10 ³	25,3·10 ³
	12,9·10 ³	11,2·10 ³	14,3·10 ³	12,3·10 ³	10,3·10 ³	26·10 ³
	13,2·10 ³	11,9·10 ³	14,9·10 ³	13,9·10 ³	13,5·10 ³	27,2·10 ³
	13,3·10 ³	12·10 ³	15,5·10 ³	14,1·10 ³	15,9·10 ³	27,4·10 ³
	13,7·10 ³	13,5·10 ³	19,1·10 ³	16,1·10 ³	16·10 ³	30,2·10 ³
	13,8·10 ³	13,6·10 ³	19,3·10 ³	16,4·10 ³	18,4·10 ³	31,1·10 ³

	$14,1 \cdot 10^3$ $14,3 \cdot 10^3$	$14,8 \cdot 10^3$ $15,6 \cdot 10^3$	$19,5 \cdot 10^3$ $19,9 \cdot 10^3$ $21,1 \cdot 10^3$ $23,2 \cdot 10^3$ $23,8 \cdot 10^3$ $24,8 \cdot 10^3$ $25,7 \cdot 10^3$	$16,8 \cdot 10^3$ $18,1 \cdot 10^3$ $20,8 \cdot 10^3$ $21,8 \cdot 10^3$ $23,7 \cdot 10^3$ $24,6 \cdot 10^3$ $25,1 \cdot 10^3$	$18,5 \cdot 10^3$ $19 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$ $21 \cdot 10^3$ $23,5 \cdot 10^3$ $24,4 \cdot 10^3$ $24,6 \cdot 10^3$	$34,7 \cdot 10^3$ $35,7 \cdot 10^3$
τ_{cp}, c	$1,31 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^4$	$1,61 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$

По полученным данным построили график зависимости времени до пробоя от температуры (рис.3.4).

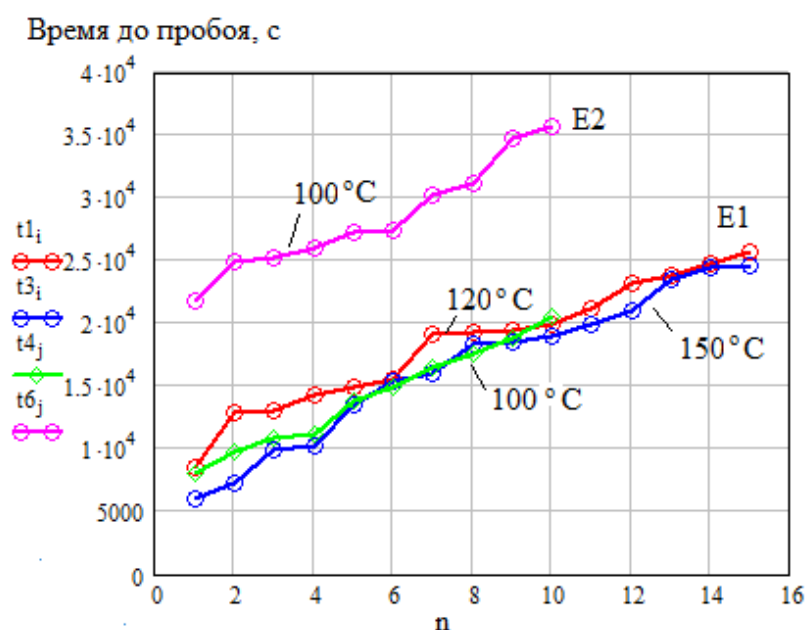


Рисунок 3.4 – Зависимость времени до пробоя от температуры

Как видно из приведенной таблицы рисунка 3.4 с ростом напряженности электрического поля (напряжения) при температуре 100 $^{\circ}C$ кривая распределения времен до пробоя лежит ниже.

Также видно, что с повышением температуры старения при одном и том же приложенном напряжении кривая распределения времен до пробоя лежит ниже. Это согласуется с литературными данными.

3.4 Анализ и обсуждение экспериментальных данных

Для оценки причин электрического старения и уменьшения среднего времени до пробоя с ростом температуры и напряженности электрического поля рассмотрим характер изменения величин $\text{tg}\delta$ и C исследуемых образцов, которые мы измеряли до старения и после пробоя и которые представлены в таблицах 3.3 и 3.4).

Таблица 3.3 – Результаты измерений $\text{tg}\delta$ и C до старения

T°С	80	100	120	140	150
C _x , пФ	6.33	5.49	4.42	5.08	4.34
	5.86	7.18	4.71	6.01	4.48
	5.36	6.58	4.54	4.33	3.63
	5.85	6.98	4.33	4.16	3.98
	3.76	7.25	3.72	4.56	4.45
	4.56	6.98	4.88	3.57	4.18
	5.34	5.96	5.06	4.43	3.74
	4.48	5.34	4.93	4.71	4.02
	4.26	5.36	5.78	4.13	3.67
	3.71	5.54	4.35	4.06	3.72
			4.05	3.89	5.42
			4.59	4.13	4.67
			5.42	4.37	4.17
			3.98	4.66	4.18
			6.91	5.02	5.72
$\text{tg}\delta$	0.0019	0.0048	0.0014	0.0043	0.017
	0.0025	0.0015	0.0013	0.0032	0.015
	0.0051	0.0047	0.0017	0.0017	0.0054
	0.0063	0.0038	0.0033	0.0021	0.013
	0.0025	0.0044	0.0005	0.0033	0.014
	0.0098	0.0036	0.0114	0.0031	0.0017
	0.0037	0.004	0.0052	0.0014	0.0030
	0.0032	0.0003	0.0024	0.0011	0.0046
	0.001	0.0025	0.0069	0.0030	0.0029
	0.0088	0.0013	0.0205	0.0020	0.0025
			0.0013	0.0041	0.0043
			0.0004	0.0060	0.0032
			0.0003	0.0073	0.0017
			0.0006	0.0087	0.0021
			0.006	0.0166	0.0033

Таблица 3.4 – Результаты измерений $\text{tg}\delta$ и C после пробоя

T°С	80	100	120	140	150	100
-----	----	-----	-----	-----	-----	-----

C _x , пФ	6.41	4.49	3.49	3.66	3.34	7,19
	6.1	7.08	3.7	3.39	3.48	6,59
	5.86	5.58	4.29	4.24	4.63	7,88
	6.79	5.94	3.86	3.48	4.98	8,86
	5.26	7.05	3.5	3.14	3.45	4,2
	6.72	5.8	4.33	3.45	6.34	8,19
	5.82	6.07	4.88	3.96	2.8	4,88
	6.19	6.69	5.23	3.62	4.68	5,22
	5.46	6.07	5.49	5.13	3.73	4,1
	7.13	8.58	5.53	3.31	3.62	5,02
			6.27	3.75	3.57	6,213
			6.38	3.28	4.01	
			6.44	3.17	5.15	
			7.13	3.97	2.77	
			7.42	3.73	3.73	
tgδ	0.0069	0.0005	0.0067	0.0023	0.0073	0,0026
	0.0011	0.0015	0.0023	0.0066	0.0053	0,0094
	0.0069	0.0017	0.0067	0.0052	0.0043	0,0022
	0.0082	0.0068	0.007	0.0021	0.0015	0,0045
	0.0033	0.0046	0.011	0.014	0.0087	0,0064
	0.0064	0.0015	0.006	0.0041	0.0027	0,0024
	0.0013	0.0016	0.0022	0.0011	0.0041	0,002
	0.005	0.0003	0.0043	0.0022	0.0036	0,0042
	0.0023	0.0017	0.0051	0.0030	0.0052	0,0083
	0.0022	0.0059	0.0001	0.016	0.0082	0,0012
			0.0006	0.0093	0.0057	0,0043
			0.0003	0.0055	0.0051	
			0.0004	0.0058	0.0065	
			0.0049	0.0017	0.0013	
			0.0075	0.0022	0.0013	

На основе полученных данных были построены графики зависимости средних значений $\text{tg}\delta_{\text{cp}}=f(t)$ и $C_{\text{cp}}=f(t)$ до старения и после старения при двух температурах (рис.3.5 и рис.3.6).

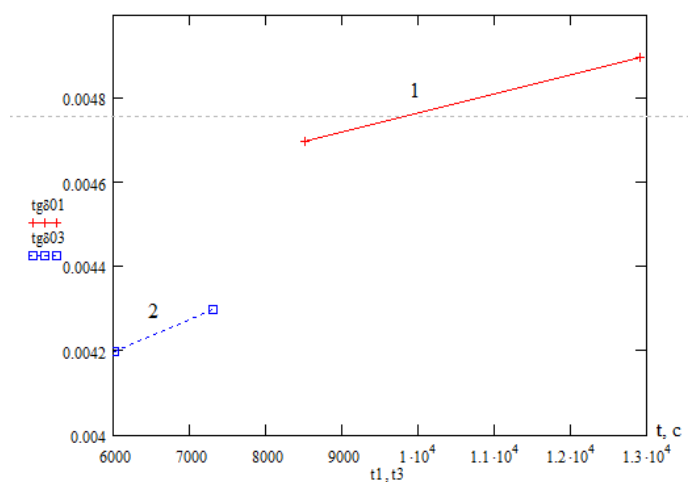


Рисунок 3.5 – Зависимость средних значений до и после старения $\text{tg}\delta_{\text{cp}} = f(t)$, при $t_1 = 120^\circ\text{C}$ и $t_3 = 150^\circ\text{C}$

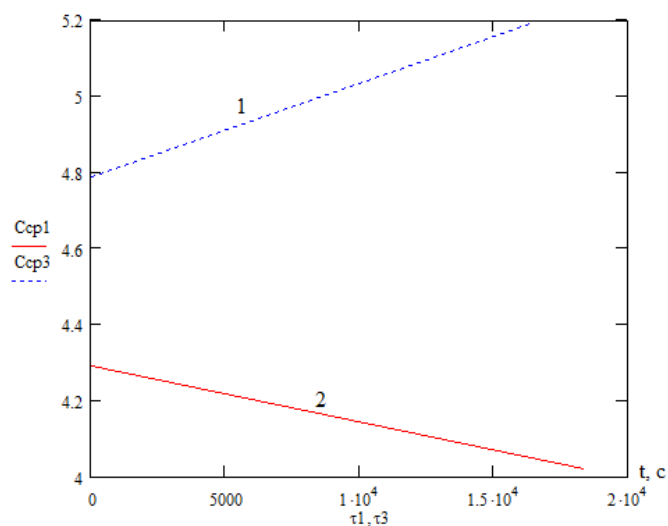


Рисунок 3.6 – Зависимость средних значений $C_{\text{cp}} = f(t)$ до и после старения при $t_1 = 120^\circ\text{C}$ и $t_3 = 150^\circ\text{C}$

Из рисунка 3.5 следует, что средние значения $\text{tg}\delta_{\text{cp}}$ возрастают с увеличением времени до пробоя (времени старения). Это показывает, что в процессе электрического старения происходит ухудшение диэлектрических свойств материала. Это возможно связано с ростом проводимости.

С другой стороны, из рисунка 3.6 видно, что изменение емкости C_{cp} от времени до пробоя имеет неоднозначный характер. Т.е. в одном случае она незначительно возрастает (кривая 1), в другом случае незначительно

снижается (кривая 2). Учитывая незначительное изменение емкости от времени старения, можно предположить, что ее изменение не является значимым критерием для оценки процесса старения, хотя величина емкости отражает изменение величины ε , входящее в формулу расчета емкости:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (3.1)$$

Где C - емкость плоского конденсатора, Ф; S - площадь пластин конденсатора, м²; d - расстояние между пластинами, м; ε_0 - электрическая постоянная, Ф/м; ε - относительная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая, что исследуемые образцы имели форму скруток двух проводников, точность измерения емкости во многом зависит от площади соприкосновения изоляции (контакта) двух проводников друг с другом.

Другой причиной электрического старения, которая может проявить себя в процессе испытаний, является возможность образования коронных разрядов, которые могут образовываться в месте контакта проводов друг с другом под воздействие высокого напряжения. Частично это проявляется в образовании запаха озона в термокамере. При возникновении коронных разрядов в изоляции происходит быстрое старение изоляции, что сказывается на снижении надежности и срока службы изоляции провода

Для экспериментальной проверки данного предположение были проведены испытания на наличие короны. Для этого испытывались 2 партии образцов по 10 шт. в каждой партии. Число скручиваний определили на основе ГОСТА Р МЭК 60 851-5-2008. Образцы первой группы были помещены в термокамеру при температуре 70°C, а второй при 100°C. Испытания проводились на переменном токе частотой 5 кГц напряжением 1200 В. Общий вид образцов для испытания показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Общий вид образцов для испытания

Как видно на рисунке 3.7, при приложении напряжения на поверхности образцов возникает корона в виде синего свечения. Это подтвердило наши предположения о возможности развития короны в процессе старения.

3.5 Оценка возможности использования термофлуктуационной теории для анализа полученных результатов

В литературном обзоре было показано, что для описания зависимостей времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля может быть использована термофлуктуационная теория разрушения, в основе которого лежит механизм разрушения за счет разрыва химических связей в материале под действием температуры и других нагрузок. В данной работе нами произведен расчет параметров уравнения кривой жизни на использовании методики, описанной в [12].

Для расчета параметров используем полученные нами результаты по измерению времени до пробоя, приведенные в таблице 3.5 при двух температурах и напряженности электрического поля.

Расчет проводится с использованием программы Mathcad.

- 1) Рассчитываем вероятность безотказной работы $P(t)$

$$P_i = \frac{n-i+0.5}{n+0.5}, \quad (3.2)$$

где n – число образцов, i – номер образца.

- 2) Значения x находим из условия равенства функции $F(x)$ и $f(x)$

$$F = 2 \cdot k \cdot \frac{T}{D} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right), \quad (3.3)$$

$$\phi(x) = \sqrt{1 - 2x} - x \ln \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1 - 2x} - 1 \right], \quad (3.4)$$

где k – постоянная Больцмана; t_0 - постоянная времени, с..

- 3) Для нахождения значений x при известной величине $f(x)$ воспользуемся функцией вида $V_1(x_1, t_1)$ и $V_2(x_2, t_2)$ соответственно при начальных значениях $x_1 = 0,01$ и $x_3 = 0,01$

$$V(x, t) = \phi(x) - 2 \cdot k \cdot \frac{T}{t_0}, \quad (3.5)$$

- 4) Тогда значение (x) найдем как функцию Z_1, Z_3 соответственно:

$$Z_i = \text{root}(V(x, t), x), \quad (3.6)$$

- 5) Найдем параметры уравнения надежности из следующих условий. В случае однородного электрического поля $\eta=1$, т.к. у нас неоднородное поле, то $\eta=1.3$, $\beta_1=2$

- 6) При каждой вероятности пробоя находим b и его математическое ожидание:

$$b_{1i} = \frac{1}{T_3 - T_1} \cdot \ln \left(\frac{Z_{1i}}{Z_{3i}} \right), \quad (3.7)$$

$$b_1 = \frac{\sum_i b_{1i}}{n} = 0,013.$$

- 7) Находим параметр A по результатам испытаний первой партии и соответственно значениях β_1 при t_1 $E=E_1$

$$A_1 = \frac{Z_{1i}}{\frac{1}{D} \cdot e^{-b_1 \cdot T_1 \cdot \eta \cdot E_1 \cdot \beta_1}} = 3,67 \cdot 10^{-26}, \quad (3.8)$$

$$\beta_1 = \frac{Z_{1i}}{\frac{1}{D} A_1 \cdot e^{-b_1 \cdot T_1} \cdot \eta \cdot E_1} = 2. \quad (3.9)$$

8) Рассчитаем время до пробоя при температуре T_1 и напряженности поля E_1 , на основе найденных параметров уравнения надежности.

Найденные параметры: $b_1=0,013$; $\beta_1=2$; $A_1=3,67 \cdot 10^{-26}$; $E_1=4,41 \cdot 10^{-26}$ В/м.

Постоянные: $D=5,5 \cdot 10^{-19}$ Дж/св; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К°; $t_0=1 \cdot 10^{-13}$ сек.

$$x_{T_1} = \frac{1}{D} \cdot A_1 \cdot e^{-b_1 \cdot T_1} \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot E_1, \quad (3.10)$$

$$\Phi_{T_1} = \sqrt{1 - 2 \cdot x_{T_1}} - x_{T_1} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{T_1}} + \frac{1}{x_{T_1}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{T_1}} - 1 \right), \quad (3.11)$$

$$\tau_1 = t_0 \cdot \exp \left(\frac{D \cdot x_{T_1}}{2 \cdot k \cdot T_1} \right), \quad (3.12)$$

Где t_0 – постоянная времени, с; k – постоянная Больцмана, Дж/К°; D – энергия разрыва химической связи, Дж; $\varphi(x)$ – функция от действующих нагрузок (x), вызывающих уменьшение потенциального барьера; A – параметры уравнения, определяемые экспериментально; η – коэффициент, учитывающей повышение напряженности электрического поля за счет формы электродов; β – коэффициент, учитывающий повышение напряженности электрического поля за счет неоднородности структуры материала диэлектрика; E – напряженность приложенного электрического поля, [В/м]; b – коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала с температурой, 1/К°.

С точки зрения термодинамики известно, что $\tau_0 \cong 10^{-13}$ с, т.е. время перехода атомов из одного равновесного состояния в другое за счет тепловых флуктуаций.

По тем же формулам и рассчитаем время до пробоя при температуре T_3 и напряженности поля E_1 : $x_{T_3} = 0,034$; $\phi_{T_3} = 0,829$; $\tau_1 = 9,351 \cdot 10^3, \text{с}$.

9) Построили график зависимости времени до пробоя от температуры при напряженности поля E_1 по рассчитанным значениям и нанесем точки средних значений времени до пробоя $\tau_{ср1}$ и $\tau_{ср3}$ по данным эксперимента и для сравнения точки времени до пробоя τ_{T1} и τ_{T3} , полученные расчетным путем при температуре T_1 и напряженности поля E_1 .

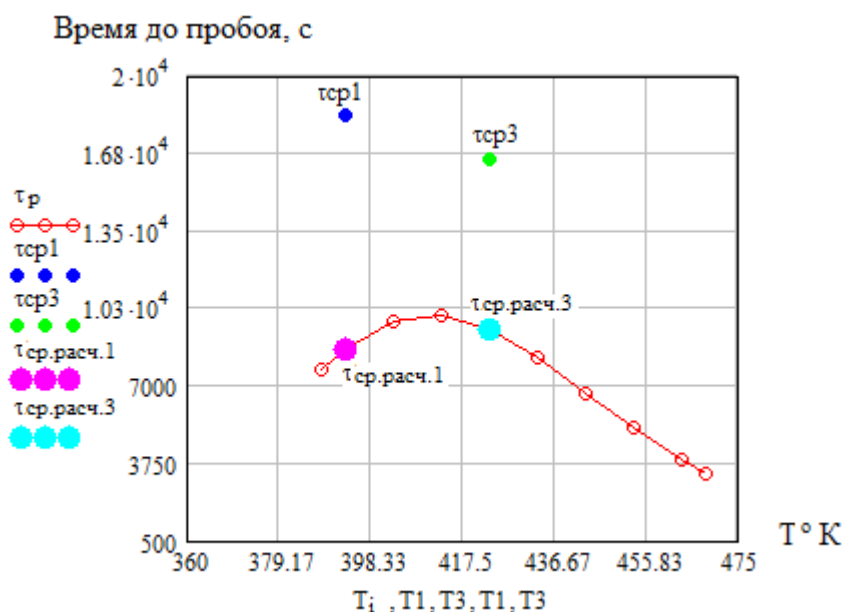


Рисунок 3.8 – График зависимости времени до пробоя от температуры при напряженности поля E_1 по расчетным значениям.

10) Построим график зависимости времени до пробоя от температуры при напряженности E_1 с учетом значения среднего времени до пробоя $\tau_{ср4}$ при температуре $T_4 = 100^\circ\text{C}$.

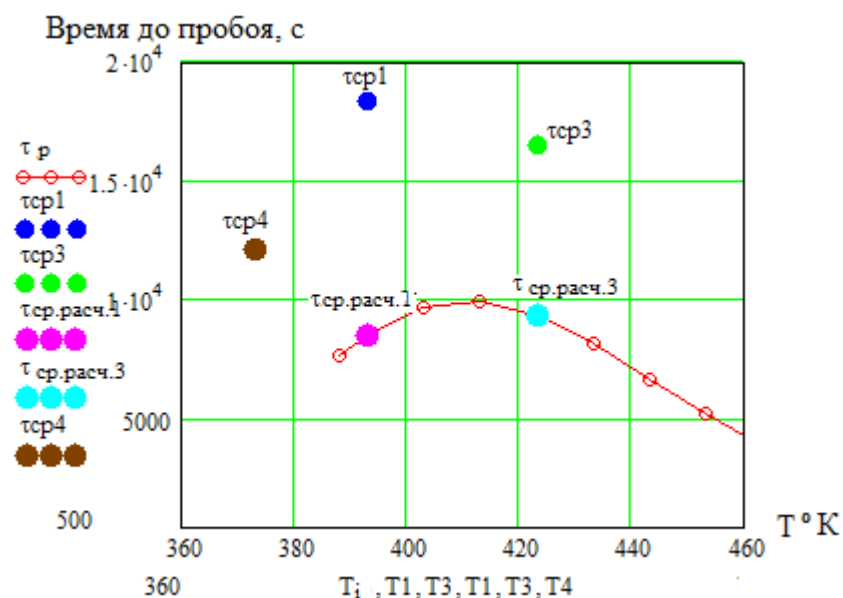


Рисунок 3.9 – Зависимость времени до пробоя от температуры при напряженности E1 с учетом значения среднего времени до пробоя $\tau_{ср4}$

Из полученного графика видно, расчетные и экспериментальные значения среднего времени до пробоя несколько отличаются. Расчетная кривая дает заниженные значения времени до пробоя, что может быть связано с неточностью расчета параметров и коэффициентов без учета реальных условий старения.

Из приведенных рис. 3.8 и 3.9 можно также отметить, что характер зависимости, построенный, по расчетным данным имеет вид кривой с максимумом. Такой же характер изменения времени до пробоя наблюдается по экспериментальным данным.

11) Проанализируем зависимость времени до пробоя от напряженности поля при различных температурах T1 и T3 на основе термофлуктуационной теории.

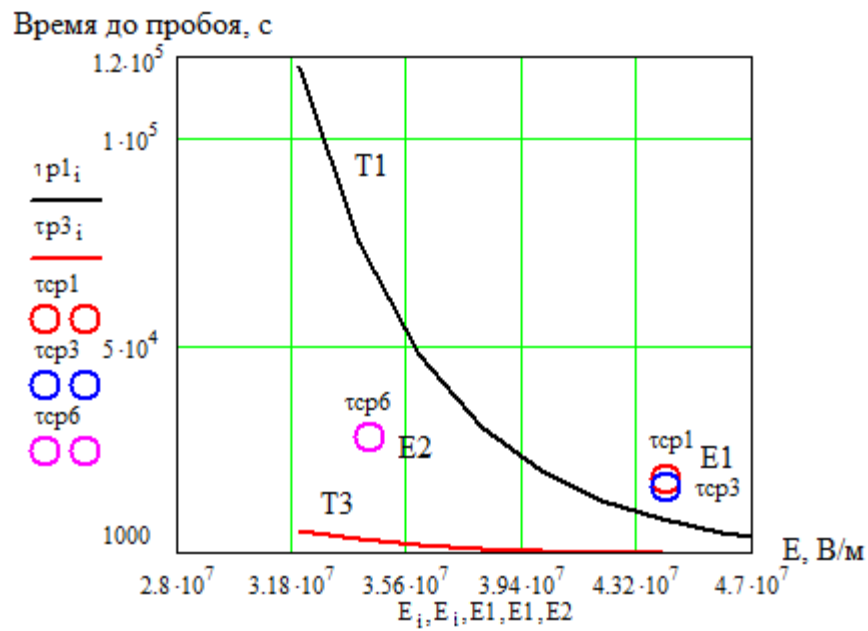


Рисунок 3.10 – Зависимость времени до пробоя от напряженности поля при различных температурах T1 и T3 на основе термофлуктуационной теории.

Из данного графика видно, что изменение напряженности электрического поля значительно сильнее оказывает влияние на характер кривой. Однако можно отметить, что экспериментальные точки среднего времени до пробоя лежат в растворе полученных кривых зависимости времени до пробоя от напряженности поля при различных температурах T1 и T3.

12) Учитывая неточность нахождения параметров уравнения надежности, уточним значения этих параметров из условия полученных данных и проанализируем зависимость времени до пробоя от напряженности электрического поля и температуры согласно термофлуктуационной теории. Зная значения среднего времени до пробоя на основе экспериментальных данных при разных температурах и напряженностях поля найдем коэффициент $\phi(x)$ по формуле

$$\phi_5 = \frac{(\ln(\tau_{cp1})) - \ln(\tau_{cp3}) \cdot 2 \cdot k}{D \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3} \right)} = 0,03. \quad (3.13)$$

После уточнения найденных параметров проанализируем зависимость времени до пробоя от температуры

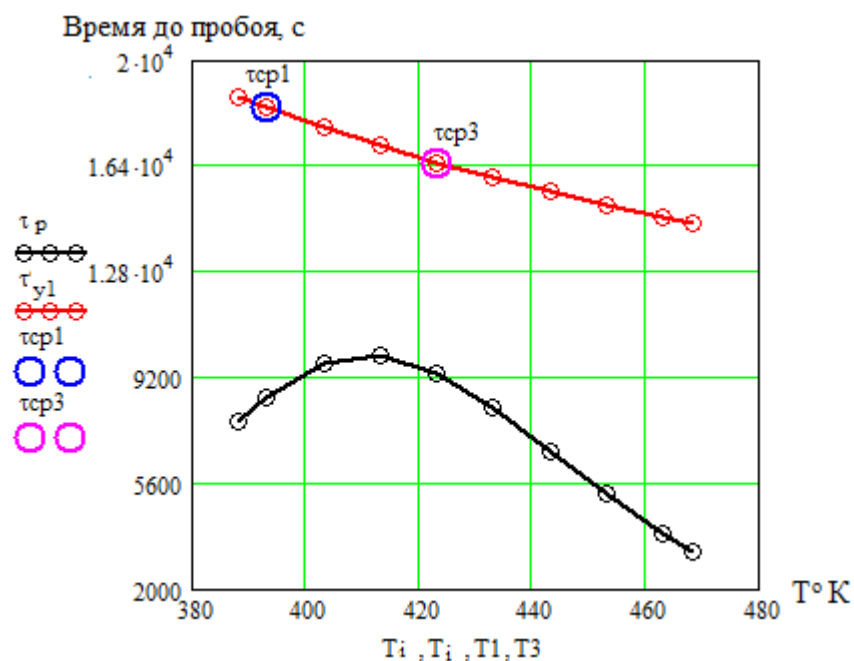


Рисунок 3.11 – Зависимость времени до пробоя от температуры после уточнения найденных параметров

Из приведенного рисунка 3.11 видно, что по уточненным параметрам кривая зависимости времени до пробоя от температуры хорошо согласуется с экспериментальными данными и данными из литературного обзора.

В литературном обзоре нами было также показано, что для описания зависимостей времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля можно использовать различные эмпирические уравнения. Произведем расчет коэффициентов, входящих в эти уравнения и для сравнения рассчитаем зависимости времени до пробоя от температуры и напряженности электрического поля.

13) Оценим зависимость времени жизни от напряженности электрического поля согласно уравнениям степенного вида, которое имеет вид:

$$\tau_{ст} = A_{ст} \cdot E_i^{-m}, \quad (3.14)$$

Параметры для данного уравнения найдем, таким образом:

$$m = \frac{\log(\tau_{cp6}) - \log(\tau_{cp4})}{(\log(E_1) - \log(E_2))} = 3,386; A_{ст} = \frac{\tau_{cp6}}{E_2^{-m}} = 9,3 \cdot 10^{29}, \quad (3.15)$$

Где τ_{cp4} – среднее время до пробоя при Т4; τ_{cp6} – среднее время до пробоя при Т6; E_i – задаем произвольно.

Строим графики зависимости времени жизни $\tau_{ст}$ от напряженности электрического поля для уравнения степенного вида, согласно расчетным данным (рисунок 3.12).

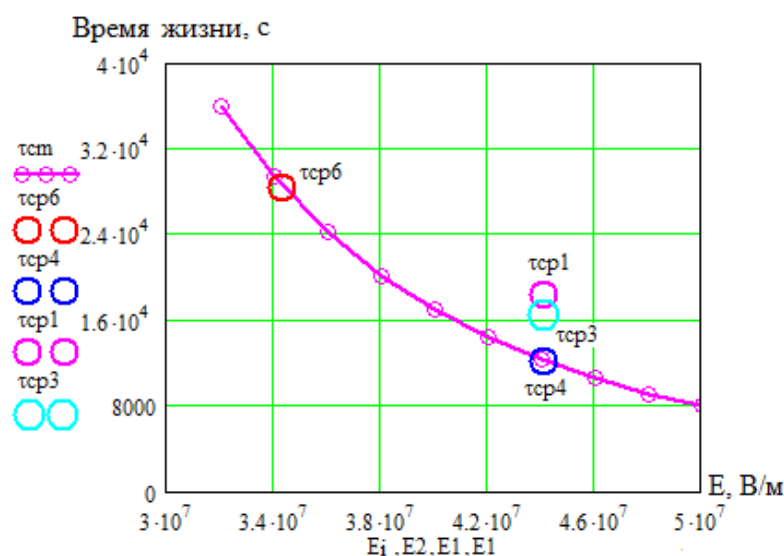


Рисунок 3.12 – Зависимость времени жизни от напряженности электрического поля для уравнения степенного вида, согласно расчетным данным (здесь $\tau_{ст}$ – кривая времени жизни; $\tau_{ср1}$, $\tau_{ср3}$, $\tau_{ср4}$, $\tau_{ср6}$ – среднее время до пробоя при $T = 120, 150, 100^\circ\text{C}$)

Как видно из данного графика, экспериментальные значения времени до пробоя при температуре 100°C совпадают с расчетной зависимостью от напряженности электрического поля по уравнению степенного вида.

14) Проанализируем зависимость времени жизни тек от напряженности электрического поля на основе уравнения экспоненциального вида

$$\tau = B \cdot e^{-bE}, \quad (3.16)$$

где B и b параметры, отражающие свойства изоляции.

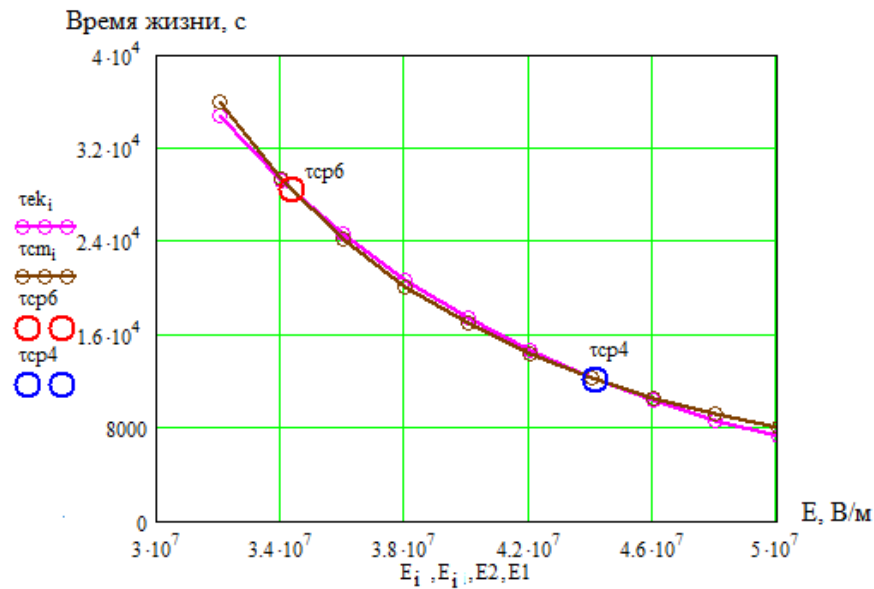


Рисунок 3.14 – зависимость времени жизни тек от напряженности электрического поля на основе уравнения экспоненциального вида

Как видно из приведенного рисунка 10 расчетные зависимости времени до пробоя практически совпадают и имеют одинаковый характер.

15) Оценим изменение времени жизни τ_k от напряженности электрического поля на основе комбинированного уравнения, учитывающего действие приложенного напряжения и температуры:

$$\tau = C \cdot U^{-N} \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}. \quad (3.17)$$

Находим величину ΔW_k при постоянстве напряженности поля

$$\Delta W_k = \frac{(\ln(\tau_{cp1})) - \ln(\tau_{cp3})}{\left(\frac{1}{T_1 \cdot k} - \frac{1}{T_3 \cdot k}\right)} = 8,12 \cdot 10^{-21}. \quad (3.18)$$

Значение постоянной N находим при постоянстве температуры

$$N = \frac{(\ln(\tau_{cp6})) - \ln(\tau_{cp4})}{\ln(U_2) - \ln(U_1)} = 3,386, \quad (3.19)$$

$$C = \frac{\tau_{ср3}}{U2^{-N} \cdot e^{\frac{\Delta W_K}{kT3}}} = 1,007 \cdot 10^{17}, \quad (3.20)$$

где k – постоянная Больцмана; $U1, U2$ – напряженности поля.

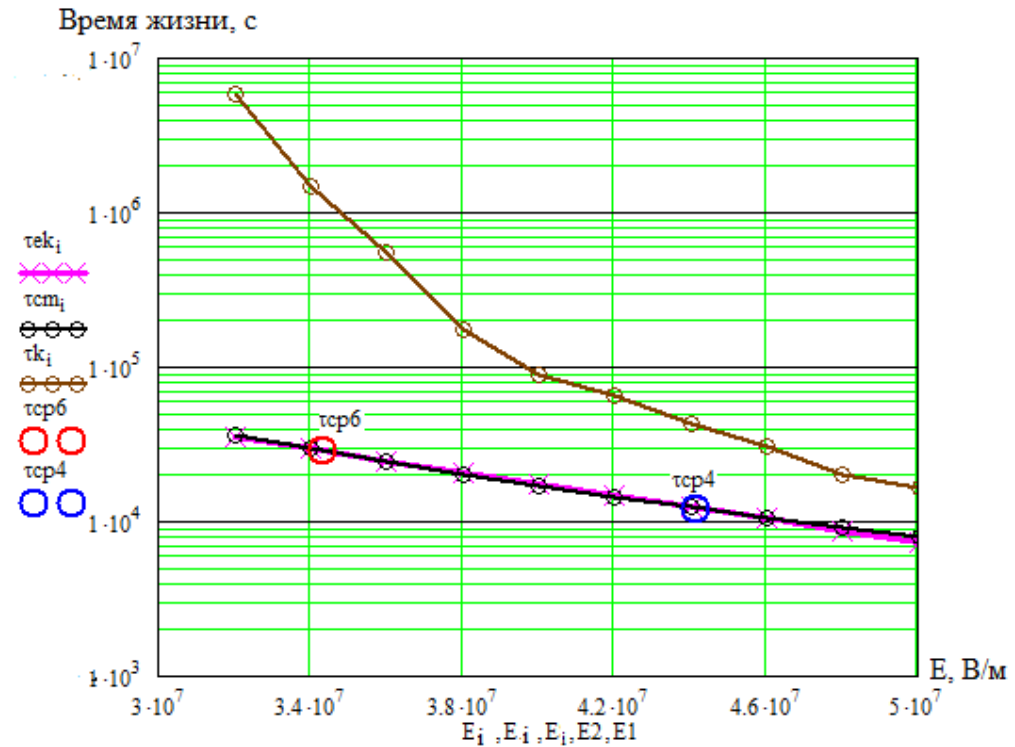


Рисунок 3.15 – Зависимость времени жизни τ_k от напряженности электрического поля на основе комбинированного уравнения

Уравнение комбинированного вида в отличие от уравнений степенного и экспоненциального вида позволяет оценить влияние на время до пробоя, как температуры, так и напряженности электрического поля.

Однако из приведенного рисунка 3.15 видно, что рассчитанная зависимость на основе уравнения комбинированного вида от кривых, рассчитанных на основе уравнения экспоненциального вида, а экспериментальные значения среднего времени до пробоя не укладываются на данную кривую.

Таким образом, можно сказать, что зависимость времени до пробоя может быть описаны как эмпирическими уравнениями, так и на основе термofлуктуационной теории. Однако использование эмпирических

уравнений не дает физического объяснения закономерностям электрического старения и практически наталкивается на большие затруднения, связанные с отсутствием в литературе значений параметров изоляции входящих в эти уравнения, а также отсутствием условий, в которых проводились исследования [1].

Выводы:

В результате проделанной работы нами установлено:

1. Время до пробоя зависит от температуры и напряженности электрического поля уменьшается с их ростом, что согласуется с литературными данными.

2. Показано, что электрическое старение сопровождается увеличением значения тангенса угла диэлектрических потерь и развитием коронных разрядов на поверхности проводов в зоне их соприкосновения.

3. Зависимости времени до пробоя могут быть описаны как эмпирическими уравнениями, так и уравнением надежности на основе термофлуктуационной теории.

4. В отличие от эмпирических уравнений, не дающих описания механизма старения, уравнение надежности на основе термофлуктуационной теории позволяет объяснить уменьшение времени до пробоя с ростом температуры и напряженности электрического поля за счет разрыва химических связей под действием тепловой энергии с учетом действия напряженности электрического поля и других нагрузок.

Приложение П
(Обязательное)

Раздел 7

**Investigating the effects of temperature and electric field intensity on time
before breakdown of bonding polyimide insulated wire**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Баданова Айана Алексеевна		

Консультант кафедры ЭКМ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меркулов В. И.	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Федоринова З. В.	к.п.н.		

Introduction

Solid dielectric materials are used in all kinds of electrical circuits and devices to insulate one current carrying part from another when they operate at different voltages. A good dielectric should have low dielectric loss, high mechanical strength, should be free from gaseous inclusion, and moisture, and be resistant to thermal and chemical deterioration. Solid dielectrics have higher breakdown strength compared to liquids and gases.

Studying breakdown in solid dielectrics is of great importance. When breakdown occurs, solids get permanently damaged while gases fully and liquids partly recover their dielectric strength after the applied electric field removed. In practice we can define the electrical breakdown as an abrupt rise of electrical current under the effect of an electric field. Its causes depend on the medium, the environmental conditions, the geometry, type and material of the electrodes, and on the type and amplitude of the electric field.

The maximum electric field achievable in a dielectric without the occurrence of an electrical breakdown is called dielectric strength, typically expressed in kV/mm. The mechanism of breakdown is a complex phenomenon in the case of solids, and varies depending on the time of application of voltage as shown in Fig.1.1.

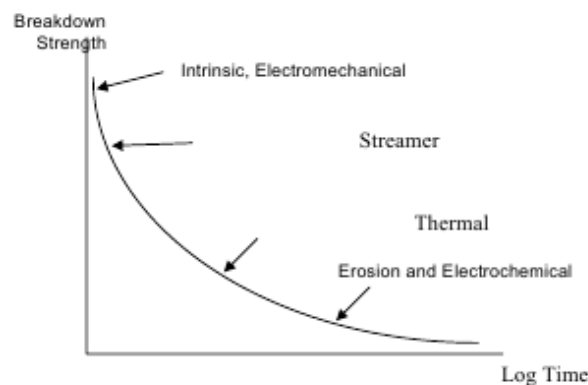


Fig.1.1 Variation of breakdown strength with time after application of voltage

The aim of the present work is to investigate the effects of temperature and electric field intensity on time before breakdown of bonding polyimide insulated wire.

The research object is the heat resistant wire MS 26 - 15.

The research methods are the dependability theory of electrical designs

The scientific novelty of this work is to evaluate the factors affecting the reliability of the polyimide insulation.

The practical value of the work is to evaluate the effects of temperature and electric field intensity on polyimide isolation.

The structure and volume of work

Our work has of 88 pages (excluding annexes) and consists of an introduction, five chapters, conclusion, references and appendices. Each chapter consists of several logically interrelated paragraphs, followed by a conclusion where we present the results of our work. The total outcome of the research is summarized in a separate conclusion. Our references consist of 40 sources represented by books of Russian and foreign authors.

1 Breakdown in dielectrics

1.1 Intrinsic breakdown

When voltages are applied only for short durations of the order of 10^{-8} s the dielectric strength of a solid dielectric increases very rapidly to an upper limit called the intrinsic electric strength. Experimentally, this highest dielectric strength can be obtained only under the best experimental conditions when all extraneous influences have been isolated and the value depends only on the structure of the material and the temperature. The maximum electrical strength recorder is 15 MV/cm for polyvinyl-alcohol at -196°C . The maximum strength usually obtainable ranges from 5 MV/cm.

Intrinsic breakdown depends upon the presence of free electrons which are capable of migration through the lattice of the dielectric. Usually, a small number of conduction electrons are present in solid dielectrics, along with some structural imperfections and small amounts of impurities. The impurity atoms, or molecules or both act as traps for the conduction electrons up to certain ranges of electric fields and temperatures. When these ranges are exceeded, additional electrons in addition to trapped electrons are released, and these electrons participate in the conduction process.

Based on this principle, two types of intrinsic breakdown mechanisms have been proposed.

a) Electronic Breakdown

Intrinsic breakdown occurs in time of the order of 10^{-8} s and therefore is assumed to be electronic in nature. The initial density of conduction (free) electrons is also assumed to be large, and electron-electron collisions occur. When an electric field is applied, electrons gain energy from the electric field and cross the forbidden energy gap from the valence band to the conduction band. When this process is repeated, more and more electrons become available in the conduction band, eventually leading to breakdown.

b) Avalanche or Streamer Breakdown

This is similar to breakdown in gases due to cumulative ionization. Conduction electrons gain sufficient energy above a certain critical electric field and cause liberation of electrons from the lattice atoms by collision. Under uniform field conditions, if the electrodes are embedded in the specimen, breakdown will occur when an electron avalanche bridges the electrode gap.

An electron within the dielectric, starting from the cathode will drift towards the anode and during this motion gains energy from the field and loses it during collisions. When the energy gained by an electron exceeds the lattice ionization potential, an additional electron will be liberated due to collision of the first electron. This process repeats itself resulting in the formation of an electron avalanche. Breakdown will occur, when the avalanche exceeds a certain critical size.

In practice, breakdown does not occur by the formation of a single avalanche itself, but occurs as a result of many avalanches formed within the dielectric and extending step by step through the entire thickness of the material.

In practice the electrical breakdown appears below, sometimes much below, the intrinsic limit of the material. Parameters and phenomena affecting the dielectric strength are:

- material type and characteristics (of course);
- type and duration of the applied electric field;
- mechanical integrity: in most cases it is a mechanical failure, like a crack, which triggers a fault;
- radiation damage: leading to a mechanical failure or to a change of dielectric properties;
- chemical actions (like oxidation): typically triggered or accelerated by radiation, temperature;
- hydrolysis: in particular when the insulating system is not water-tight;
- contamination;
- interfaces: in many cases they are a favorites path for a breakdown. At an interface the electric field can be increased due to variations of the dielectric

constant, for example, in case of presence of air bubbles, the dielectric strength can be reduced, for example, due to presence of humidity or free ions, as a mechanical discontinuity and interface may lead to a mechanical failure;

- progressive erosion of the material creating a breakdown path: starting from air bubbles or propagating along surfaces/interfaces, having different forms (treeing, tracking, partial discharges);
- ageing: some of the above phenomena/parameters produce a progressive transformation over time.

1.2 Electromechanical breakdown

When solid dielectrics are subjected to high electric fields, failure occurs due to electrostatic compressive forces which can exceed the mechanical compressive strength.

If the thickness of the specimen is d_0 and is compressed to thickness d under an applied voltage V , then the electrically developed compressive stress is in equilibrium.

1.3 Thermal breakdown

In general, the breakdown voltage of a solid dielectric should increase with its thickness. But this is true only up to a certain thickness above which the heat generated in the dielectric due to the flow of current determines the conduction.

When an electric field is applied to a dielectric, conduction current however small it may be, flows through the material. The current heats up the specimen and the temperature rise. The heat generated is transferred to the surrounding medium by conduction through the solid dielectric and by radiation from its outer surfaces. Equilibrium is reached when the heat used to raise the temperature of the dielectric, plus the heat radiated out, equals the heat generated.

The heat generated under d. c. stress E is given as

$$W_{d.c.} = E^2 \sigma W / \text{cm}^3 \quad ()$$

where σ is the d. c. conductivity of the specimen.

Under a. c. fields, the heat generated

$$W_{a.c.} = \frac{\frac{E^2 f \epsilon r \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} \cdot W}{cm^3}, \quad ()$$

where, f = frequency in Hz, δ = loss angle of the dielectric material, and E = rms value. The heat dissipated (W_r) is given by

$$W_r = C \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \text{div}(K \text{ grad } T), \quad ()$$

where, C_v = specific heat of the specimen,

T = temperature of the specimen, K = thermal conductivity of the specimen, and

t = time over which the heat is dissipated.

Equilibrium is reached when the heat generated a.c ($W_{d.c}$ or $W_{a.c}$) becomes equal to the heat dissipated (W_r). In actual practice there is always some heat that is radiated out.

Breakdown occurs when $W_{d.c.}$ or $W_{a.c.}$ exceeds W_r . The thermal instability condition is shown in Fig. 1.2. Here, the heat lost is shown by a straight line, while the heat generated at fields E_1 and E_2 is shown by separate curves. At field E_2 breakdown occurs both at temperatures A B T and T heat generated is less than the heat lost for the field E_2 , and hence the breakdown will not occur.

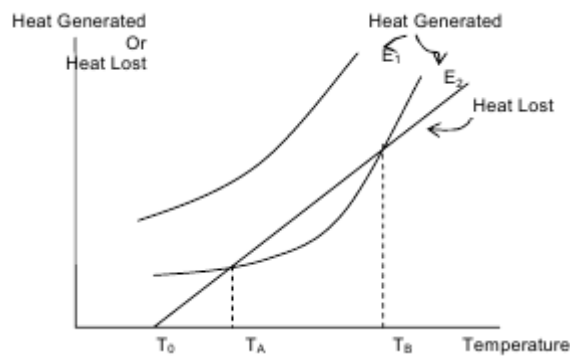


Fig.1.2 Thermal instability in solid dielectrics

1.4 Chemical and Electrochemical Deterioration and Breakdown

In the presence of air and other gases some dielectric materials undergo chemical changes when subjected to continuous stresses. Some of the important chemical reactions that occur are:

- Oxidation: In the presence of air or oxygen, material such as rubber and polyethylene undergo oxidation giving rise to surface cracks.

- Hydrolysis: When moisture or water vapor is present on the surface of a solid dielectric, hydrolysis occurs and the material loses their electrical and mechanical properties. Electrical properties of materials such as paper, cotton tape, and other cellulose materials deteriorate very rapidly due to hydrolysis. Plastics like polyethylene undergo changes, and their service life considerably reduces.

- Chemical Action: Even in the absence of electric fields, progressive chemical degradation of insulating materials can occur due to a variety of processes such as chemical instability at high temperatures, oxidation and cracking in the presence of air and ozone, and hydrolysis due to moisture and heat. Since different insulating materials come into contact with each other in any practical reactions occur between these various materials leading to reduction in electrical and mechanical strengths resulting in a failure.

The effects of electrochemical and chemical deterioration could be minimized by carefully studying and examining the materials. High soda content glass insulation should be avoided in moist and damp conditions, because sodium, being very mobile, leaches to the surface giving rise to the formation of a strong alkali which will cause deterioration.

It was observed that this type of material will lose its mechanical strength within 24 hrs, when it is exposed to atmospheres having 100% relative humidity at 700 C. In paper insulation, even if partial discharges are prevented completely, breakdown can occur due to chemical degradation. The chemical and electrochemical deterioration increases very rapidly with temperature, and hence high temperatures should be avoided.

1.5 Breakdown Due to Internal Discharges

Solid insulating materials, and to a lesser extent liquid dielectrics contain voids or cavities within the medium or at the boundaries between the dielectric and the electrodes.

These voids are generally filled with a medium of lower dielectric strength, and the dielectric constant of the medium in the voids is lower than that of the insulation. Hence, the electric field strength in the voids is higher than that across the dielectric. Therefore, even under normal working voltages the field in the voids may exceed their breakdown value, and breakdown may occur.

When the breakdown occurs in the voids, electrons and positive ions are formed. They will have sufficient energy and when they reach the void surfaces they may break the chemical bonds. Also, in each discharge there will be some heat dissipated in the cavities, and this will carbonize the surface of the voids and will caused erosions of the material. Channels and pits formed on the cavity surfaces increase the conduction. Chemical degradation may also occur as a result of the activate discharge products formed during breakdown.

All these effect will result in a gradual erosion of the material and consequent reduction in the thickness of insulation leading to breakdown. The life of the insulation with internal discharges depends upon the applied voltage and the number of discharges. Breakdown by this process may occur in a few or days or may take a few years.

1.6 Breakdown of composite insulation

Ageing is the process by which the electrical and mechanical properties of insulation normally becomes worse in condition (deteriorate) with time. Ageing occurs mainly due to oxidation, chemical degradation, irradiation, and electron and ion bombardment on the insulation. Tracking is another process by which ageing of the insulation occurs.

Usually partial discharge tests are used in ageing studies to estimate the discharge magnitudes, discharge inception, and extinction voltages. Change of loss angle ($\tan \delta$) during electrical stressing provides information of the deterioration

occurring in insulation systems. The knowledge of the mechanical stresses in the insulation, controlling of the ambient conditions such as temperature and humidity, and a study of the gaseous products evolved during ageing processes will also help to control the breakdown process in composite insulation. Finally, stress control in insulation systems to avoid high electric stress regions is an important factor in controlling the failure of insulation systems.

2 The basic empirical equation to describe the breakdown

In practice, to describe the aging processes of insulators and finding time to breakdown are often used empirical equation:

- *exponential equation of the form:*

$$\tau_{np} = B \cdot e^{-bE}, \quad (1)$$

where B, b are the coefficients that reflect the conditions of the experiment.

- *the equation sedate of the kind:*

$$\tau_{np} = A \cdot E^{-n}, \quad (2)$$

where A, n is constant depending on the material of the dielectric.

- *the combined equation of the kind:*

$$\tau_{np} = CU^{-n} \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (3)$$

Here C, n – constants,

ΔW – the height of the potential barrier,

T – temperature, K,

k is the Boltzmann's constant.

3The experimental part

3.1 Definition of short-term breakdown voltage

Before the start of testing for long-term strength, we need to determine the momentary breakdown voltage at which the samples will be tested in the future.

To assess short-term breakdown voltage, the samples are tested for breakdown voltage in alternating current frequency of 50 Hz in water, on a high-voltage installation is shown in Fig.7 in accordance with GOST 2990-78.

Test 10 groups of samples of wires for 5 samples in each group. To create the most rigid test conditions that mimic operating conditions, samples of pre-wound wire placed in a heat chamber and kept at a temperature of 250°C.

Removing any groups of samples was every two days, and then were tested to determine the short-term breakdown voltage (Fig.2.).

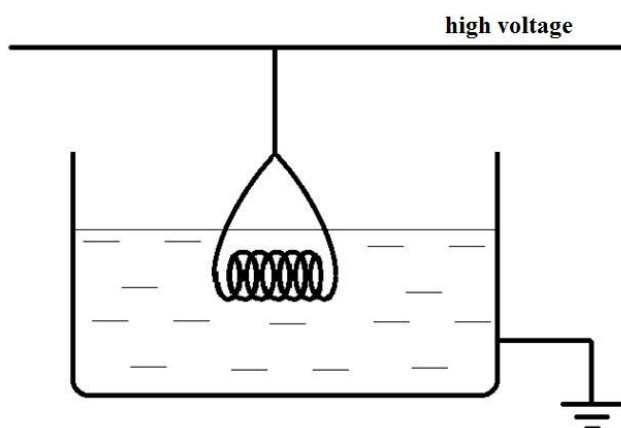


Fig.2. The definition of short-time breakdown voltage insulation wire specimens after exposure to elevated temperatures

The results of tests on the breakdown voltage of samples of wires with a solid polyimide insulation are given in table 1.

Table 1 – test Results for breakdown voltage in the initial state and after exposure to a temperature of 250 °C

T, °C	n, number of samples	t, h	a Breakdown voltage of polyimide isolation (average value), kV
in the initial state	5	0	14,8
250	5	72	13,4
	5	96	14,2
	5	144	12,6
	5	240	11,8
	5	288	12,7
	5	336	12,5
	5	482	11,6
	5	578	11
	5	674	11,3
Average:			12.3

The results obtained by changing the breakdown voltage wiring patterns with a solid polyimide insulation can determine the average short-term breakdown voltage of 12.3 kV.

3.2 Description of the experimental results on time before breakdown

On the basis of the previous section 3.1., we chose the level of the test voltage - 9, 7 kW. The temperature selected for conducting tests: 80, 100, 120, 140, 150. Then the samples of the first batch are placed in a heat chamber, we set the desired temperature aging (Fig.2.)



Fig.2. General view of the samples placed in a heat chamber

It should be noted that each successive batch of samples is laid at another temperature to eventually evaluate the effect of temperature on the time to breakdown. Once a breakdown occurs, the time is recorded. The test results are shown in Table 1.

Table 1 – The test results for up to breakdown

Upr, kV	9 kV					7 kV
T, °C	80	100	120	140	150	100
t, c	$11,6 \cdot 10^3$	$8,1 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$21,8 \cdot 10^3$
	$11,8 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$	$12,9 \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^3$	$7,3 \cdot 10^3$	$24,9 \cdot 10^3$
	$12 \cdot 10^3$	$10,9 \cdot 10^3$	$13,1 \cdot 10^3$	$7,2 \cdot 10^3$	$9,9 \cdot 10^3$	$25,3 \cdot 10^3$
	$12,9 \cdot 10^3$	$11,2 \cdot 10^3$	$14,3 \cdot 10^3$	$12,3 \cdot 10^3$	$10,3 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$
	$13,2 \cdot 10^3$	$11,9 \cdot 10^3$	$14,9 \cdot 10^3$	$13,9 \cdot 10^3$	$13,5 \cdot 10^3$	$27,2 \cdot 10^3$
	$13,3 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	$15,5 \cdot 10^3$	$14,1 \cdot 10^3$	$15,9 \cdot 10^3$	$27,4 \cdot 10^3$
	$13,7 \cdot 10^3$	$13,5 \cdot 10^3$	$19,1 \cdot 10^3$	$16,1 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	$30,2 \cdot 10^3$
	$13,8 \cdot 10^3$	$13,6 \cdot 10^3$	$19,3 \cdot 10^3$	$16,4 \cdot 10^3$	$18,4 \cdot 10^3$	$31,1 \cdot 10^3$
	$14,1 \cdot 10^3$	$14,8 \cdot 10^3$	$19,5 \cdot 10^3$	$16,8 \cdot 10^3$	$18,5 \cdot 10^3$	$34,7 \cdot 10^3$
	$14,3 \cdot 10^3$	$15,6 \cdot 10^3$	$19,9 \cdot 10^3$	$18,1 \cdot 10^3$	$19 \cdot 10^3$	$35,7 \cdot 10^3$
			$21,1 \cdot 10^3$	$20,8 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	
			$23,2 \cdot 10^3$	$21,8 \cdot 10^3$	$21 \cdot 10^3$	
			$23,8 \cdot 10^3$	$23,7 \cdot 10^3$	$23,5 \cdot 10^3$	
			$24,8 \cdot 10^3$	$24,6 \cdot 10^3$	$24,4 \cdot 10^3$	
			$25,7 \cdot 10^3$	$25,1 \cdot 10^3$	$24,6 \cdot 10^3$	
τ_{cp}, c	$1,307 \cdot 10^4$	$1,214 \cdot 10^4$	$1,837 \cdot 10^9$	$1,609 \cdot 10^4$	$1,625 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$

Conclusion

From the outcome of our investigation it is possible to conclude that the results will be used in design, production and operation of polyimide insulated wires and cables.