ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
имени В. А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 621.315.616:544.236.2:537.9:51-74

КИСЕЛЕВИЧ
Валентин Владимирович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Гомель 2026

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Научный руководитель:	**Шабловский Ярослав Олегович,** кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и электротехники УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».
Официальные оппоненты:	**Гольдаде Виктор Антонович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»;
	Кочергина Ольга Викторовна, кандидат технических наук, доцент, декан факультета инжиниринга и технологий связи УО «Белорусская государственная академия связи».
Оппонирующая организация:	Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению».

Защита состоится «23» декабря 2026 года в 14^{00} часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а; e-mail: mpri@mpri.org.by; тел.: +375(0232)34-17-12; факс: +375(0232)34-17-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси».

Автореферат разослан «3» ноября 2026 года.

Учёный секретарь
Совета по защите диссертаций Н. С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Превосходные диэлектрические свойства полимеров обусловливают их широкое применение в качестве изоляционных материалов электротехнических устройств. Эксплуатационная надёжность и долговечность таких устройств во многом зависят от электрической прочности их изоляции. В связи с этим исследования закономерностей электрического разрушения (пробоя) и поиск путей повышения электрической прочности полимерных электроизоляционных материалов (ПЭИМ) крайне актуальны.

Значительный вклад в развитие физики пробоя полимерных материалов внесли Б. И. Сажин, А. И. Слуцкер, М. А. Багиров, М. Э. Борисова, В. А. Закревский, Н. Т. Сударь, W. G. Oakes, J. Artbauer, M. Ieda, L. A. Dissado. Их усилиями заложены основы теории электрического разрушения полимеров, на большом экспериментальном материале установлены общие закономерности изменения электрической прочности и долговечности ПЭИМ при воздействии электрического поля, температуры и других эксплуатационных факторов. В частности, предложен физический механизм накопления повреждений макромолекул, объясняющий кинетическую природу процесса потери электрической прочности полимеров, получен ряд аналитических выражений для оценки долговечности и пробивной напряжённости ПЭИМ. Между тем, недостаточно изучено влияние на электрическую прочность полимерных материалов релаксационных переходов, способных приводить к заметному искажению истинного хода её температурной зависимости, требуют уточнения способы оценки долговечности ПЭИМ при малых вероятностях пробоя.

Вопросы применения теории электрического старения и разрушения полимеров для прогнозирования показателей эксплуатационной надёжности и долговечности (интенсивности отказов, срока службы, остаточного ресурса) полимерной изоляции освещались С. Н. Койковым, В. Я. Ушаковым, Г. С. Кучинским, В. Ф. Важовым, J. M. Oudin, H. Hirose, G. Mazzanti, L. Simoni. Нашедшие отражение в их трудах прогнозные методы, как правило, опирались на представления о распределении срока службы электрической изоляции по вероятностному закону Вейбулла, что не всегда оправдано, поскольку использование данного закона приводит к постоянству функции интенсивности отказов изоляции, нехарактерному для «нормально стареющих» электротехнических объектов. В то же время за рамками рассмотрения необоснованно оставались составные вероятностные распределения, в большей мере отвечающие физике отказов полимерной электрической изоляции.

Настоящая работа ставит целью в некоторой степени восполнить означенные пробелы посредством развития феноменологического подхода к описанию закономерностей электрического разрушения полимерных материалов и характеризации эксплуатационной долговечности полимерной изоляции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Представленные в диссертации результаты получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы по гранту Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов «Электрические свойства изоляционных материалов на основе органических диэлектриков с частично упорядоченной структурой» (№ ГР 20130213, 2013 г.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь, утверждённым Указами Президента Республики Беларусь: № 156 от 07.05.2020, раздел 4 – машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы, 2021–2025 гг.; № 135 от 01.04.2025, раздел 1 – цифровые технологии и искусственный интеллект: математические теории и методы, высокопроизводительные вычислительные системы, цифровые модели и двойники, раздел 2 – инновационные технологии в промышленности: технологии и оборудование (техника) в металлургии, машиностроении, станко- и приборостроении, 2026–2030 гг.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – выявление закономерностей влияния напряжённости электрического поля и температуры на электрическую прочность и долговечность полимерных изоляционных материалов с разработкой на этой основе методики оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса изоляции силовых кабелей.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи.

1. Определить характер влияния напряжённости электрического поля на время ожидания пробоя полимерных изоляционных материалов и получить выражение зависимости их электрической долговечности от пороговой напряжённости этого поля.

2. Выявить закономерности влияния эксплуатационной температуры на электрическую прочность полимерных изоляционных материалов и получить выражение температурной зависимости их пробивной напряжённости в широком интервале температур, охватывающем переходную область её наиболее резкого снижения.

3. Установить влияние максимальной локальной напряжённости электрического поля на время зарождения дендритов в полимерных изоляционных материалах и получить выражение для оценки её пороговой величины.

4. Исследовать влияние структурных особенностей полимерных материалов на критическую напряжённость их электрического пробоя в области релаксационных переходов.

5. Выявить корреляционные зависимости, отражающие взаимосвязь кинетических явлений стеклования и электрического разрушения полимеров.

6. Построить математическую модель отказа полимерной электрической изоляции, позволяющую определять ключевые показатели надёжности силовых кабелей.

7. Разработать методику оценки технического состояния электрической изоляции кабелей, позволяющую прогнозировать основные характеристики её эксплуатационной долговечности.

Объект исследования: природные и синтетические полимерные материалы, применяемые в качестве изоляции токоведущих частей электротехнических устройств.

Предмет исследования: закономерности влияния напряжённости электрического поля и эксплуатационной температуры на электрическую прочность и долговечность полимерных изоляционных материалов.

Научная новизна

1. Установлены закономерности влияния напряжённости электрического поля и эксплуатационной температуры на электрическую прочность, долговечность и дендритостойкость полимерных изоляционных материалов в рамках феноменологического описания явления электрического пробоя средствами математической теории катастроф и получены соответствующие аналитические зависимости:

– зависимость электрической долговечности полимерных материалов от напряжённости электрического поля, базирующаяся на функции катастрофы складки, задаваемой рядом Тейлора третьего порядка, позволяющая выполнять корректную оценку долговечности при малых вероятностях пробоя в отличие от известных степенных зависимостей;

– температурная зависимость пробивной напряжённости полимерных материалов, основанная на функции катастрофы сборки, задаваемой рядом Тейлора четвёртого порядка, пригодная для описания плавного, резкого и скачкообразного снижения напряжённости электрического пробоя в переходной области температур;

– зависимость между временем зарождения дендритов и максимальной локальной напряжённостью электрического поля в полимерной изоляции, базирующаяся на функции катастрофы складки, обеспечивающая возможность оценки пороговой напряжённости, исключающей образование дендритов в изоляции высоковольтных устройств на протяжении заданного времени её эксплуатации.

2. Выявлены закономерности влияния структурных особенностей полимерных материалов на критическую напряжённость их электрического пробоя в области релаксационных переходов, показавшие возрастание этой

напряжённости при уменьшении гибкости полимерной цепи и увеличении размера боковых групп и степени полярности полимера.

3. Обнаружена корреляционная зависимость пробивной напряжённости от энергии активации релаксационных переходов, наблюдаемых вблизи критической температуры пробоя полимерного материала, выступающая отражением взаимосвязи кинетических явлений стеклования и электрического разрушения полимеров.

4. Предложенная математическая модель отказа полимерной электрической изоляции основана на суперпозиции экспоненциального и равномерного законов распределения вероятностей, что способствует достоверному определению ключевых показателей надёжности изоляции силовых кабелей на длительном интервале времени эксплуатации.

5. Разработанная методика оценки технического состояния электрической изоляции кабелей позволяет прогнозировать основные характеристики её эксплуатационной долговечности по результатам измерений активного сопротивления, выполненных при вводе кабеля в работу и в момент текущего контроля изоляции, чем достигается упрощение диагностики общего состояния кабелей.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитические выражения, устанавливающие закономерности влияния напряжённости электрического поля и эксплуатационной температуры на электрическую прочность, долговечность и дендритостойкость полимерных изоляционных материалов, позволяющие описать:

– зависимость электрической долговечности полимерных материалов от напряжённости электрического поля, базирующуюся на функции катастрофы складки, задаваемой рядом Тейлора третьего порядка;

– температурную зависимость пробивной напряжённости полимерных материалов, основанную на функции катастрофы сборки, задаваемой рядом Тейлора четвёртого порядка;

– зависимость между временем зарождения дендритов и максимальной локальной напряжённостью электрического поля в полимерной изоляции, базирующуюся на функции катастрофы складки.

2. Закономерности влияния структурных особенностей полимерных материалов на критическую напряжённость их пробоя в области релаксационных переходов:

– возрастание критической напряжённости электрического пробоя при уменьшении гибкости полимерной цепи и увеличении размера боковых групп и степени полярности полимера;

– корреляционная зависимость пробивной напряжённости от энергии активации релаксационных переходов, наблюдаемых вблизи критической

температуры пробоя полимерного материала, отражающая взаимосвязь кинетических явлений стеклования и электрического разрушения полимеров.

3. Математическая модель отказа полимерной электрической изоляции, основанная на суперпозиции экспоненциального и равномерного законов распределения вероятностей, позволяющая определять ключевые показатели надёжности силовых кабелей.

4. Методика оценки технического состояния электрической изоляции кабелей, позволяющая прогнозировать основные характеристики её эксплуатационной долговечности по результатам измерений активного сопротивления, выполненных при вводе кабеля в работу и в момент текущего контроля изоляции, что упрощает диагностику общего состояния кабелей.

Личный вклад соискателя учёной степени заключается в аналитическом описании закономерностей поведения полимерных материалов в сильном электрическом поле, разработке математической модели отказа и методики оценки технического состояния полимерной электрической изоляции, проведении испытаний изоляционных материалов на электрическую прочность, выполнении анализа и обработки экспериментальных и эксплуатационных данных, подготовке рукописей научных трудов и организации практического использования предложенных технических решений. Основные результаты диссертации, выносимые на защиту и отражающие её научную и практическую значимость, получены соискателем лично. Выбор темы диссертации и общего направления исследований, постановка цели и задач работы, научное редактирование публикаций, а также обсуждение полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем кандидатом физико-математических наук Я. О. Шабловским. Из 25 работ, опубликованных по теме диссертации, 17 выполнены соискателем самостоятельно и 8 в соавторстве с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, включённые в диссертацию, были представлены и обсуждены на республиканских и международных научных конференциях: «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилёв, 2013); «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» (Минск, 2013); «Поликомтриб» (Гомель, 2013, 2025); «Технологія» (Сєвєродонецьк, 2015); «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (Гомель, 2016); «Физикохимия процессов переработки полимеров» (Иваново, 2016, 2019); «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (Нальчик, 2021); «Диэлектрики-2024» (Санкт-Петербург, 2024); на выставке инновационных разработок «Новые материалы в промышленности, природопользовании, строительстве и медицине» (Минск, 2014); на междисциплинарных форумах: «Наука и бизнес-2014» (Минск, 2014); «Новые мате-

риалы и перспективные технологии» (Москва, 2020).

Основные результаты диссертации внедрены в учебный процесс электротехнических дисциплин Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого (ГГТУ имени П. О. Сухого), Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ), Белорусского национального технического университета (БНТУ), в энергетический сектор Гомельского городского района электрических сетей филиала «Гомельские электрические сети» РУП «Гомельэнерго» (ГГРЭС) и ОАО «Гомсельмаш».

Опубликованность результатов диссертации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в числе которых 10 статей в рецензируемых научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (общим объёмом 8,26 авт. л.), 3 статьи в сборниках материалов научных форумов и конференций, тезисы 11 докладов и 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объём диссертации составляет 180 страниц, в том числе 32 рисунка на 16 страницах, 28 таблиц на 13 страницах, библиографический список из 227 наименований на 19 страницах, список публикаций соискателя из 25 наименований на 3 страницах и 5 приложений на 17 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и прикладных исследований в области физики пробоя и электрического старения ПЭИМ. Важнейшие результаты в этой области получены в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Национальном исследовательском университете «МЭИ», Томском политехническом университете, Нагойском университете (Япония), Болонском университете (Италия), Коннектикутском университете (США). Отмечено, что известные теоретические уравнения электрической долговечности полимерной изоляции обычно представляют собой разновидность уравнения прочности С. Н. Журкова. Они учитывают физический механизм электрического разрушения ПЭИМ и, как правило, обеспечивают хорошее согласие расчётных и экспериментальных оценок долговечности. Это, однако, нередко достигается выбором завышенных значений коэффициента локального усиления электрического поля в объёме ПЭИМ, плохо коррелирующих с уровнем испытательного напряжения.

Показано, что аналитические уравнения, построенные на основе интеграла Бейли, отражающего накопительный характер повреждений полимер-

ных макромолекул в электрическом поле, позволяют достоверно прогнозировать линейный ход температурных кривых пробивной напряжённости ПЭИМ в области низких и средних температур. В то же время справедливость выражений, моделирующих резкое падение пробивной напряжённости в переходной области и области высоких температур, подтверждена для небольшого числа ПЭИМ. Сделано предположение, что восполнению этого пробела может способствовать применение теории катастроф. Её феноменологическая природа позволяет получать достаточно простые уравнения, описывающие изменение электрической прочности ПЭИМ с учётом внезапности наступления и катастрофического характера пробоя.

Установлено, что для прогнозирования эксплуатационной долговечности полимерной изоляции действующих электроустановок широкое распространение приобрели методы, базирующиеся на измерении её сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, ёмкости, уровня частичных разрядов, абсорбционного тока и других электрических характеристик, чувствительных к влиянию температуры и рабочих градиентов электрического поля. Обозначена необходимость в совершенствовании данных методов, поскольку многие из них весьма трудоёмки и требуют проведения большого количества натурных измерений. Определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и основные задачи диссертации.

Вторая глава посвящена анализу влияния напряжённости электрического поля и температуры на электрическую прочность (пробивную напряжённость) и долговечность (время ожидания пробоя) полимерных изоляционных материалов. С позиций теории катастроф получено выражение зависимости электрической долговечности t_{br} полимерных материалов от величины напряжённости E_t приложенного поля:

$$t_{br} = t_D / [1 + (E_t / E_{tD} - 1)^2 / a_t], \qquad (1)$$

где t_D – пороговое время ожидания пробоя ПЭИМ в электрическом поле напряжённостью $E_t = E_{tD}$, с;

E_{tD} – величина допустимой рабочей напряжённости, соответствующей заданному ресурсу ПЭИМ, МВ/м;

a_t – положительный масштабный множитель.

Формула (1) базируется на соотношении для функции катастрофы складки и одном из ключевых положений ионизационной теории электрического разрушения полимерных материалов, согласно которому пробой ПЭИМ наступает по достижении в его объёме критической концентрации носителей заряда $N_c \approx 10^{18} - 10^{19}$ см$^{-3}$. Показано, что, в сравнении с известными степенными уравнениями, выражение (1) обеспечивает конечное значение долговечности t_{br} при наведении в ПЭИМ электрического поля с пороговой

напряжённостью E_{tD}, когда имеет место эффект значительного усиления зависимости $t_{br}=f(E_t)$. Это позволяет избежать математической абстракции $t_{br}\to\infty$ при $E_t=E_{tD}$, идущей вразрез с тем, что в действительности время от подачи напряжения на ПЭИМ до его пробоя конечно. Подтверждена применимость выражения (1) для ряда полимерных материалов (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры выражения полевой зависимости электрической долговечности полимерных электроизоляционных материалов

Полимерный электроизоляционный материал	Значение параметра выражения (1)		
	a_t, 10^{-4}	E_{tD}, МВ/м	t_D, 10^7 с
Конденсаторная бумага, пропитанная маслом	14,570	18,58	0,3507
Конденсаторная плёнка полиэтилентерефталата	22,180	24,16	0,0199
Эпоксидная смола	1,7910	4,59	1,0260
Эпоксидный компаунд ЭЗК-1	0,9673	2,32	29,230
Сшитый полиэтилен	37,670	9,82	92,630

Предложено выражение температурной зависимости пробивной напряжённости полимерных материалов E_{br}:

$$E_{br}=E_D\left(1-\sqrt[3]{a_T(T/T_D-1)+A_w(E_{br}/E_D-1)}\right), \qquad (2)$$

где E_D – пробивная напряжённость в физической критической точке – точке перегиба на экспериментальной кривой $E_{br}=f(T)$, МВ/м;

a_T – масштабный коэффициент;

T – температура, К;

T_D – температура в критической точке, К;

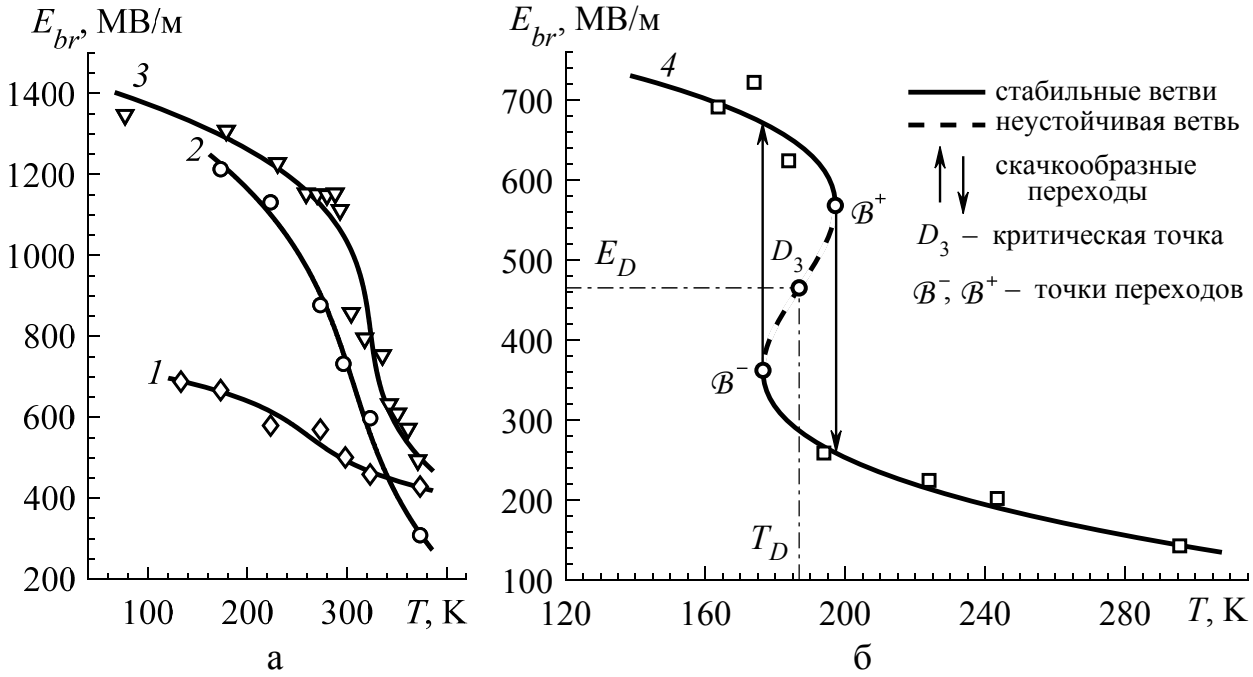
A_w – безразмерный параметр скорости роста напряжённости E_t.

Выражение (2) получено на основе функции катастрофы сборки. Её наступлению отвечает момент накопления критической концентрации зарядов N_c в полимерном материале, испытываемом при температуре, в окрестности которой имеет место резкое падение E_{br}.

Показано, что в отличие от известных соотношений, используемых для моделирования зависимости $E_{br}=f(T)$, выражение (2) позволяет описывать плавное (рисунок 1а, кривая *1*), резкое (рисунок 1а, кривые *2*, *3*) и скачкообразное (рисунок 1б, кривая *4*) снижение напряжённости пробоя при плавном увеличении температуры в широких границах, охватывающих переходную область, где скорость падения E_{br} максимальна.

Выполнена обработка опубликованных экспериментальных данных о зависимости $E_{br}=f(T)$, позволившая определить параметры выражения (2) для ряда полимерных материалов (таблица 2). Подтверждено, что быстрое падение пробивной напряжённости в районе критической температуры T_D, кото-

рому отвечают малые значения отношения A_w/a_T, главным образом свойственно электроизоляционным материалам на основе аморфных неполярных полимеров с низкой температурой стеклования T_g.



1 – поликарбонат; *2* – фторированный этилен-пропилен;
3 – полиметилметакрилат; *4* – полибутадиен

Рисунок 1 – Экспериментальные (символы) и теоретические (линии) температурные зависимости пробивной напряжённости (E_{br}) полимерных материалов: а – кривые плавного (*1*) и резкого (*2*, *3*) снижения E_{br}; б – кривая, моделирующая скачкообразное (*4*) уменьшение E_{br}

Таблица 2 – Параметры выражения температурной зависимости пробивной напряжённости полимерных материалов

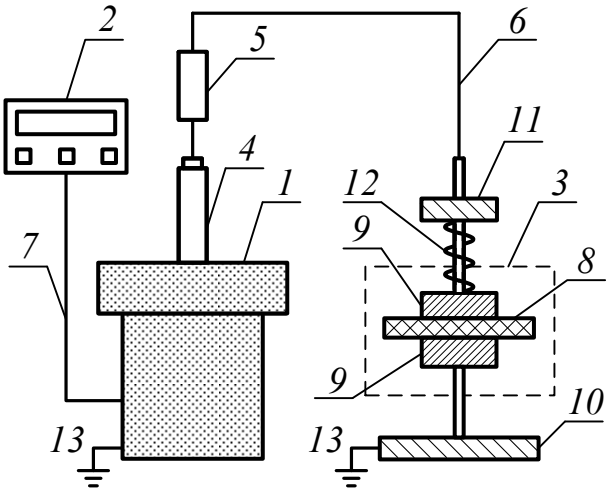
Полимерный материал	T_g, К	Параметры выражения (2)			
		T_D, К	E_D, МВ/м	a_T	A_w
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	193	320	397	0,879	0,032
Атактический полипропилен (ППА)	262	260	411	2,364	0,156
Изотактический полипропилен (ППИ)	256	296	751	0,210	0,299
Сополимер этилена и пропилена (СЭП)	220	223	276	0,583	0,021
Полиизобутилен (ПИБ)	199	208	401	0,517	–0,164
Полиметилметакрилат (ПММА)	378	323	812	0,554	0,073
Полибутадиен (ПБД)	180	187	466	0,392	–0,147
Сополимер бутадиена и стирола (СБС-75/25)	190	197	596	0,942	0,047
Сополимер бутадиена и стирола (СБС-52/48)	248	257	650	2,480	0,035
Силиконовый каучук (СК)	153	186	141	2,751	0,486
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	340	334	536	0,057	0,022

Примечание – В скобках после названий бутадиен-стирольных сополимеров указано процентное содержание звеньев бутадиена/стирола.

Отмечено, что выполнение условия $A_w/a_T<0$ для ПИБ и ПБД (таблица 2) свидетельствует о крайне резком уменьшении их пробивной напряжённости вблизи T_D и в рамках представлений теории катастроф соответствует вырождению зависимости $E_{br}=f(T)$, сопряжённому с переходом от резкого к скачкообразному («катастрофическому») падению E_{br} (рисунок 1б, кривая *4*). Выдвинуто предположение, что вырождение $E_{br}=f(T)$ при T_D связано с переходом кинетического процесса электрического разрушения данных полимеров к критической форме.

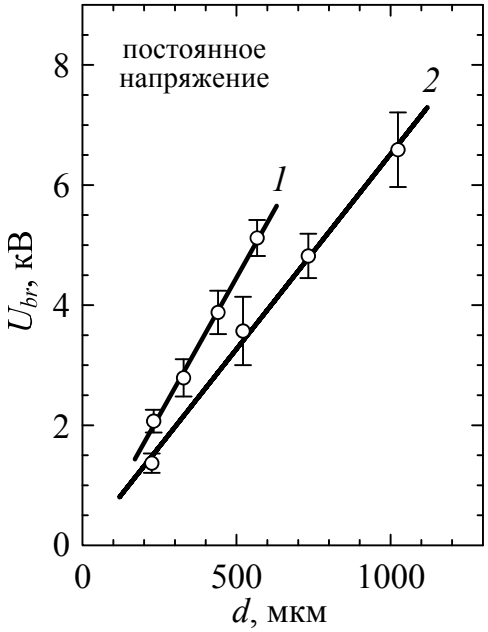
Экспериментально исследовано влияние толщины электроизоляционных материалов на их пробивное напряжение U_{br}. Опыты проводили на установке по испытанию диэлектриков АИД-70М (рисунок 2). Объектами служили плоские образцы (100×100 мм) пропитанной (ПБИ) и непропитанной (НБИ) электроизоляционной бумаги промышленного производства с толщиной одного слоя $d=110\pm10$ мкм. Измерения U_{br} осуществляли в режиме постоянного тока при температуре воздуха 20 °С.

По результатам измерений построены зависимости $U_{br}=f(d)$ для ПБИ и НБИ изоляции, демонстрирующие линейно-возрастающий характер (рисунок 3). Это указывает на независимость от толщины (с поправкой на статистический разброс) пробивной напряжённости образцов бумажной изоляции в исследованных интервалах толщин: 220–580 мкм для ПБИ и 210–1050 мкм для НБИ.



1 – высоковольтный генератор; *2* – блок управления; *3* – измерительная ячейка; *4* – высоковольтный вывод; *5* – защитное сопротивление; *6*, *7* – силовой и соединительный кабели; *8* – испытуемый материал; *9* – электроды; *10*, *11* – металлические рамы; *12* – прижимная пружина; *13* – заземление

Рисунок 2 – Схема установки по испытанию изоляции на электрическую прочность



1 – ПБИ; *2* – НБИ

Рисунок 3 – Зависимости пробивного напряжения электроизоляционной бумаги от её толщины

В третьей главе исследовано влияние релаксационных переходов и структуры полимерных материалов на их пробивную напряжённость в окрестности критической температуры T_D. Установлено, что эта температура является линейно-возрастающей функцией (с коэффициентом корреляции $r = 0{,}993$) температуры релаксационных переходов, реализуемых в области резкого падения пробивной напряжённости: α-перехода (стеклования) для ППА, ПИБ, ПБД, СЭП, СБС-75/25, СБС-52/48, ПЭТФ и СК; β-перехода, связанного с проявлением мелкомасштабной подвижности метиленовых групп CH_2 для ППИ; γ-перехода, способствующего активации вращательного движения эфирной группы $COOCH_3$ для ПММА; λ-перехода, ответственного за размораживание подвижности микрообъёмных физических узлов молекулярной сетки в аморфной фазе ПЭНП.

Обнаружено, что уменьшение гибкости полимерной цепи, увеличение объёма боковых групп и степени полярности полимера, которые способствуют росту температуры T_g его стеклования, приводят к возрастанию критической пробивной напряжённости E_D. На примере пары «полиизобутилен – атактический полипропилен» продемонстрировано, что эффект снижения симметричности основной полимерной цепи, обусловливающий повышение T_g, не оказывает существенного влияния на величину E_D.

Получены корреляционные зависимости, иллюстрирующие влияние полярности строения (рисунок 4, линия *1*), характеризуемой плотностью энергии когезии e_{coh}, и уровня молекулярной подвижности (рисунок 4, линия *2*), определяемого энергией активации релаксационных переходов W_a, на величину пробивной напряжённости ПЭИМ.

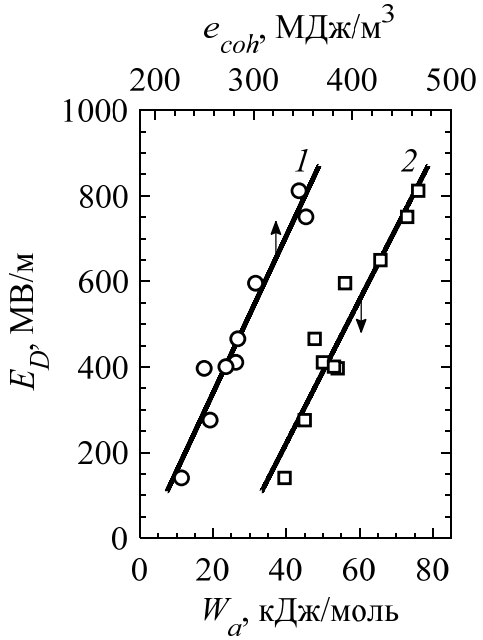


Рисунок 4 – Зависимости напряжённости пробоя ПЭИМ от плотности энергии когезии (*1*) и энергии активации релаксационных переходов (*2*)

Установлено, что критическая напряжённость пробоя E_D есть линейно-возрастающая функция как плотности энергии когезии e_{coh}, так и энергии активации релаксационных переходов W_a. Коэффициенты корреляции для функций $E_D = f(e_{coh})$ и $E_D = f(W_a)$ составили $r = 0{,}969$ и $r = 0{,}953$. На этом основании выдвинуто предположение о наличии тесной взаимосвязи релаксационных явлений, приводящих к усилению подвижности структурно-кинетических единиц полимера, и кинетического процесса электрического разрушения ПЭИМ.

В четвёртой главе дано аналитическое описание надёжности и дендритостойкости полимерной электрической изоляции. Предложено выражение, устанавливающее взаимосвязь между максимальной величиной локальной напряжённости F_m электрического поля, действующего на макромолекулы полимера, и временем τ_t зарождения в его объёме дендритов:

$$F_m(\tau_t) = F_D\left(1+\sqrt{a_{tr}(\tau_D/\tau_t - 1)}\right), \quad (3)$$

где F_D – пороговая напряжённость образования дендритов, МВ/м;

a_{tr} – положительный масштабный множитель;

τ_D – пороговое время зарождения дендритов, с.

Структура выражения (3), полученного на основе функции для катастрофы складки, обеспечивает конечное пороговое время образования дендритов τ_D при наведении в ПЭИМ электрического поля напряжённостью F_D. Дана оценка пороговых значений F_D для полиэтилена (400,7 МВ/м), сшитого полиэтилена (301,4 МВ/м) и эпоксидной смолы (149,1 МВ/м).

Разработана математическая модель отказа полимерной электрической изоляции, основанная на предположении, что реальный отказ изоляции электротехнического устройства есть наложение внезапного и постепенного отказов. Внезапный отказ, сопровождаемый скачкообразным ухудшением свойств изоляции во времени, приводящим к её пробою, моделируется экспоненциальным распределением вероятностей. Постепенный отказ, характеризуемый поэтапным ухудшением свойств изоляции вследствие её изнашивания и старения, описывается равномерным распределением вероятностей.

В рамках модели получены соотношения для функции интенсивности отказов $\mathcal{F}(t)$, средней наработки до отказа τ_M электрической изоляции и параметра потока отказов $\mathcal{F}_\omega(t)$ кабелей:

$$\mathcal{F}(t) = \frac{c_w + (1-c_w)k_1\dfrac{t_E}{t_0}e^{-t/t_0}}{t_E[1+k_1(1-c_w)(e^{-t/t_0}-1)]-c_w t}; \quad (4)$$

$$\tau_M = c_w t_E/2 + (1-c_w)k_1 t_0[1-e^{-t_E/t_0}(1+t_E/t_0)]; \quad (5)$$

$$\mathcal{F}_\omega(t) = k_{\mathcal{F}} l_1 \mathcal{F}(t)/l\,, \quad (6)$$

где c_w – долевой вклад равномерного изнашивания изоляции;

$k_1 = (1-e^{-t_E/t_0})^{-1}$ – нормирующий множитель;

t_E – время полного изнашивания изоляции в отсутствие внезапных отказов, год;

t_0 – математическое ожидание внезапного отказа, год;

t – текущее время, год;

$k_{\mathcal{F}}$ – коэффициент масштаба, учитывающий реальные условия экс-

плуатации кабеля;

l_1 – унифицированная длина, равная 1 км;

l – фактическая длина кабеля, км.

Построена зависимость параметра потока отказов $\mathcal{F}_\omega$ от времени эксплуатации t для кабелей напряжением 5–36 кВ с изоляцией на основе сшитого полиэтилена (СПЭ) (рисунок 5), демонстрирующая хорошее согласие литературных статистических данных и аппроксимирующей кривой $\mathcal{F}_\omega(t)$, соответствующей выражению (6). Показано (рисунок 5), что в сравнении с известными выражениями для параметра потока отказов $\mathcal{F}_\omega(t)$, базирующимися на распределении Вейбулла, формула (6), основанная на функции интенсивности отказов (4), обеспечивает:

1) охват всего срока эксплуатации («кривой жизни») полимерной изоляции кабелей, включая периоды приработки I, нормальной эксплуатации II и окончательного изнашивания III;

2) естественную для кабелей как «нормально стареющих» объектов плавно возрастающую частоту отказов в период нормальной эксплуатации.

Определены параметры функции $\mathcal{F}_\omega(t)$ и характеристики «кривой жизни» (длительности периодов приработки t_I и нормальной эксплуатации t_II, среднее значение параметра потока отказов $\mathcal{F}_\text{II}$ в интервале от t_I до t_II, средняя наработка до отказа τ_M) для силовых кабелей с ПБИ и СПЭ изоляцией (таблица 3). Установлено, что величина $\mathcal{F}_\text{II}$ для ПБИ-кабелей выше, чем для СПЭ-кабелей напряжением 5–36 кВ и 25 кВ в 6 и 11,5 раз соответственно.

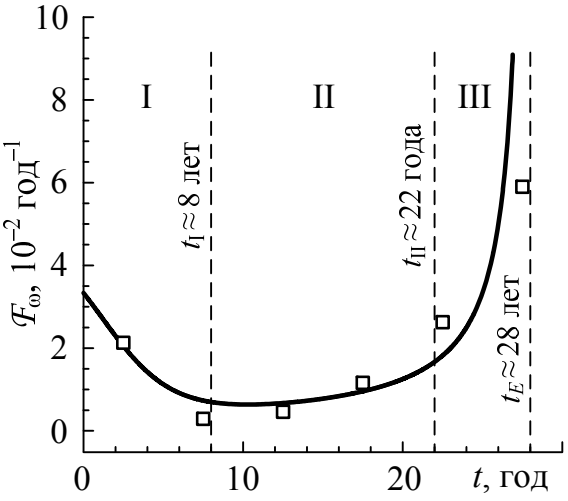


Рисунок 5 – Зависимость параметра потока отказов СПЭ-кабелей 5–36 кВ от времени эксплуатации

Таблица 3 – Показатели надёжности кабелей с полимерной изоляцией

Тип изоляции	Напряжение кабеля, кВ	Параметры функции $\mathcal{F}_\omega(t)$				Характеристики «кривой жизни»			
		c_w	t_0, год	t_E, год	$k_\mathcal{F}$	$\mathcal{F}_\text{II}$, год$^{-1}$	t_I, год	t_II, год	τ_M, год
СПЭ	5–36	0,359	2	28	0,1	0,0098	8	22	6,31
СПЭ	25	0,812	9	41	0,1	0,0051	0	28	18,26
ПБИ	6–10	0,890	10	39	1,0	0,0587	0	30	18,37

Выполнен анализ повреждаемости силовых кабелей ГГРЭС напряжением 6–10 кВ с ПБИ и СПЭ изоляцией, позволивший рассчитать значения

параметра потока отказов $\mathcal{F}_\omega$ для этих кабелей. Обнаружено, что средний уровень отказов кабелей ГГРЭС с ПБИ изоляцией ($\mathcal{F}_\omega = 0{,}227$ год$^{-1}$) сопоставим с верхним пределом параметра $\mathcal{F}_\omega$ для ПБИ-кабелей российских электросетей ($\mathcal{F}_\omega$ = 0,045–0,2 год$^{-1}$), в то время как повреждаемость СПЭ-кабелей ГГРЭС ($\mathcal{F}_\omega = 0{,}034$ год$^{-1}$) заметно выше, чем в зарубежных электрических сетях, где $\mathcal{F}_\omega$ варьируется в диапазоне от 0,003 до 0,01 год$^{-1}$. Отмечена целесообразность выполнения мероприятий по замене ПБИ-кабелей ГГРЭС, имеющих значительную степень износа, на СПЭ-кабели, обладающие более высокой надёжностью (в 6,7 раза меньшим значением $\mathcal{F}_\omega$), и проведения последующей оптимизации режимов работы СПЭ-кабелей ГГРЭС в целях снижения уровня их повреждаемости до зарубежных показателей.

Пятая глава посвящена вопросу прогнозирования эксплуатационной долговечности полимерной электрической изоляции кабелей.

Предложено выражение зависимости активного сопротивления электрической изоляции кабелей R, пересчитанного на длину 1 км и температуру 20 ºС, от времени старения t:

$$R(t) = R_\infty + (R_0 - R_\infty)\cdot\exp(-a_R t), \qquad (7)$$

где R_∞ – установившееся сопротивление дефектной изоляции, МОм·км;

R_0 – начальное сопротивление изоляции, измеренное при вводе кабеля в эксплуатацию, МОм·км;

a_R – коэффициент, определяющий скорость снижения сопротивления изоляции кабеля за время его фактической эксплуатации, год$^{-1}$.

Разработана методика оценки технического состояния электрической изоляции кабелей, основу которой составляет выражение (7). Методика предусматривает измерение значений активного сопротивления электрической изоляции, приведение измеренных значений сопротивления к стандартной длине (1 км) и нормированной температуре (20 ºС), сравнение приведённых значений с критериальным сопротивлением $\overline{R}$ и расчёт основных характеристик эксплуатационной долговечности изоляции (фактического срока службы t_f, остаточного ресурса $\Delta t'_f$, степени выработки ресурса безопасной эксплуатации k'_w, относительной скорости изнашивания k_v) по соотношениям:

$$t_f = t_e \ln\left(\frac{\overline{R} - R_\infty}{R_0 - R_\infty}\right) \Big/ \ln\left(\frac{R_t - R_\infty}{R_0 - R_\infty}\right); \qquad (8)$$

$$\Delta t'_f = t_f - t'_e; \qquad k'_w = (t'_e / t_f)\cdot 100\%; \qquad k_v = t_N / t_f, \qquad (9)$$

где t_e – время эксплуатации изоляции на момент измерения её сопротивления, год;

$\overline{R}$ – минимально допустимое по условиям нормальной эксплуатации сопротивление изоляции, МОм·км;

R_t – текущее сопротивление изоляции, измеренное в момент последнего контроля её состояния, МОм·км;

t'_e – время эксплуатации изоляции на момент расчёта $\Delta t'_f$, год;

t_N – паспортный срок службы кабеля, год.

Технический эффект от применения методики выражается:

1) в упрощении количественной оценки состояния изоляции, достигаемом за счёт уменьшения числа необходимых измерений сопротивления до двух: R_0 и R_t (значения R_∞, $\overline{R}$, входящие в формулу (8), принимаются согласно действующей нормативно-технической документации);

2) в повышении достоверности прогнозирования эксплуатационной долговечности, обеспечиваемом тем, что значение t_f вычисляется по величине R_t, наиболее полно характеризующей общую степень изношенности изоляции на момент диагностики её состояния.

Рассчитаны характеристики эксплуатационной долговечности бумажной и поливинилхлоридной изоляции силовых кабелей ГГРЭС и ОАО «Гомсельмаш» (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристики эксплуатационной долговечности изоляции силовых кабелей

Линия	Марка кабеля, число жил×сечение, мм^2	R_0 / R_t, МОм·км	t_e, год	t'_e, год	t_f, год	$\Delta t'_f$, год	k_v	k'_w, %
№659/660	АСБ 3×120	2193,4 / 33,2	38,73	40,87	50,11	9,24	0,599	81,6
№1319	АСБ 3×185	894,8 / 58,7	35,67	37,14	59,34	22,20	0,506	62,6
№1520	ААБл 3×120, ААШв 3×120	3476,0 / 15,6	32,83	35,80	35,65	–0,15	0,842	100,4
№1538	ААБл 3×240, ААБ 3×185	1049,4 / 513,5	7,15	7,43	47,02	39,59	0,638	15,8
«ЭЩ–ТП»	ВВГ 5×25	23,0 /21,2	2,00	2,39	29,69	27,30	1,01	8,1

По итогам расчёта установлено, что кабели линий №659/660, №1319, №1538 и «ЭЩ–ТП» не нуждаются в ближайшей плановой замене, поскольку степень выработки ресурса безопасной эксплуатации k'_w для изоляции этих кабелей не превышает 100%. Обнаружено, что изоляция силовых кабелей ААБл 3×120, ААШв 3×120 линии №1520 чрезмерно изношена ($k'_w = 100{,}4\%$) и находится в предпробивном состоянии, а для предотвращения аварийного отказа линии №1520 необходима срочная замена её кабелей.

Положительный опыт практического использования разработанной методики позволил внедрить её в РУП «Гомельэнерго» и ОАО «Гомсельмаш». Экономический эффект, достигаемый за счёт снижения количества проводимых испытаний электрической изоляции до одного раза в три года, составляет 12,94 тыс. руб. (на 01.01.2014 г.) в расчёте на один кабель длиной 115 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. С позиций теории катастроф получены простые аналитические выражения, описывающие закономерности влияния напряжённости электрического поля и эксплуатационной температуры на электрическую прочность, долговечность и дендритостойкость полимерных изоляционных материалов:

– структура найденного выражения полевой зависимости электрической долговечности полимерных материалов, базирующегося на функции катастрофы складки, задаваемой рядом Тейлора третьего порядка, обеспечивает конечное значение долговечности полимерного материала при воздействии на него порогового электрического поля, что позволяет выполнять корректную оценку долговечности ПЭИМ при малых вероятностях пробоя;

– предложенное выражение температурной зависимости пробивной напряжённости полимерных материалов основывается на функции катастрофы сборки, задаваемой рядом Тейлора четвёртого порядка, и учитывает условие накопления критической концентрации носителей заряда в полимерном материале в момент его пробоя, что в совокупности позволяет моделировать плавный, резкий и скачкообразный варианты снижения пробивной напряжённости ПЭИМ при плавном увеличении температуры;

– полученное выражение зависимости между временем зарождения дендритов и максимальной локальной напряжённостью электрического поля в полимерной изоляции позволяет выполнять оценку пороговых параметров дендритообразования, в результате чего достигается возможность решения важной практической задачи, состоящей в определении уровня напряжённости электрического поля, приложение которого исключает появление электрических дендритов в полимерной изоляции высоковольтных устройств на протяжении заданного времени её эксплуатации [5–А – 8–А, 13–А, 20–А, 21–А, 23–А, 24–А].

2. Выявлены закономерности влияния структурных особенностей полимерных материалов на критическую напряжённость их электрического пробоя в области релаксационных переходов. Показано, что уменьшение гибкости полимерной цепи, увеличение размера боковых групп и степени полярности полимера, способствующие росту температуры его стеклования, приводят к возрастанию критической пробивной напряжённости ПЭИМ. Обнаружены корреляционные зависимости, характеризующие влияние полярности строения и уровня молекулярной подвижности полимеров на электрическую прочность изоляционных материалов на их основе, отражающие взаимосвязь кинетических явлений стеклования и электрического разрушения этих материалов. Установлено, что критическая напряжённость пробоя

исследованных ПЭИМ есть линейно-возрастающая функция как плотности энергии когезии, так и энергии активации релаксационных переходов [2–А, 4–А, 7–А, 8–А, 16–А – 19–А].

3. Разработанная математическая модель отказа полимерной электрической изоляции базируется на суперпозиции экспоненциального распределения вероятностей, описывающего внезапный отказ в результате скачкообразного ухудшения свойств и пробоя изоляции, и равномерного распределения вероятностей, моделирующего постепенный отказ, обусловленный изнашиванием и старением изоляции, что позволяет прогнозировать эксплуатационную надёжность силовых кабелей, подверженных внезапным и износовым отказам. Показано, что «кривая жизни» полимерной электрической изоляции, построенная по предложенному соотношению для функции интенсивности её отказов от времени эксплуатации, охватывает сразу три временны́х интервала, включая периоды приработки, нормальной эксплуатации и окончательного изнашивания, чем обеспечивается повышение достоверности определения основных показателей надёжности изоляции на длительном интервале времени эксплуатации [3–А, 9–А, 12–А, 14–А, 15–А].

4. В основе разработанной методики оценки технического состояния полимерной электрической изоляции кабелей лежит предложенная аналитическая зависимость её электрического сопротивления от времени старения, позволяющая прогнозировать ключевые характеристики эксплуатационной долговечности изоляции по результатам измерений активного сопротивления, выполненных при вводе кабеля в работу и в момент текущего контроля изоляции, что избавляет от необходимости проведения многократных (периодических) испытаний кабелей и упрощает диагностику их общего состояния [1–А, 10–А, 11–А, 22–А, 25–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования на предприятиях электроэнергетической отрасли и в организациях, специализирующихся на проведении технических испытаний и неразрушающего контроля полимерной электрической изоляции. Примеры использования результатов диссертационной работы подтверждены актами о практическом использовании на предприятиях Республики Беларусь и актами о внедрении в учебный процесс высших учебных заведений.

Аналитические выражения, описывающие влияние напряжённости электрического поля и температуры на электрическую прочность и долговечность полимерных материалов, могут быть применены для обработки экспериментальных данных, получаемых в ходе испытаний изоляции на пробой, срок службы и дендритостойкость в научно-исследовательских и элек-

тротехнических испытательных лабораториях, в частности в лаборатории высоковольтных испытаний и измерений электрического цеха филиала «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго», производственной лаборатории службы метрологического обслуживания и электрофизических измерений филиала «Инженерный центр» РУП «Гомельэнерго».

Математическая модель отказа электрической изоляции может быть использована при оценке надёжности, оптимизации режимов эксплуатации и планировании сроков ремонтно-восстановительных работ силовых кабелей распределительных сетей среднего напряжения, входящих в состав промышленных предприятий и организаций электроэнергетического комплекса Республики Беларусь, в частности в состав Гомельского городского района электрических сетей филиала «Гомельские электрические сети» РУП «Гомельэнерго». Разработанная модель отказа изоляции внедрена в учебный процесс кафедры «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого.

Методику оценки технического состояния электрической изоляции рекомендуется применять в организациях, занимающихся эксплуатацией, диагностикой и прогнозированием долговечности кабельных изделий. Предложенная методика защищена патентом на изобретение [25–А], использована в учебном процессе кафедры «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого, кафедры «Электротехника» БелГУТ, кафедры «Электрические станции» БНТУ, а также внедрена в энергетический сектор ГГРЭС и ОАО «Гомсельмаш».

Положительные результаты практического применения разработанной методики создают перспективы для возможного решения с её помощью важной и социально значимой проблемы совершенствования профилактики и предупреждения чрезвычайных ситуаций, обусловленных возгоранием электрической изоляции кабелей и проводов.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Шабловский, Я. О. Предупреждение чрезвычайных ситуаций, обусловленных старением электрической изоляции кабелей и проводов / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2014. – Т. 9, № 1. – С. 133–139.

2–А. Шабловский, Я. О. Определение характеристических температур стеклообразования / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Материалы, технологии, инструменты. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 86–89.

3–А. Шабловский, Я. О. Вероятностные аспекты надёжности электрической изоляции / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Надёжность. – 2015. – № 3 (54). – С. 42–44.

4–А. Шабловский, Я. О. Термодинамическое определение температуры стеклования полимеров / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Вопросы химии и химической технологии. – 2018. – № 4 (119). – С. 148–152.

5–А. Kiselevich, V. V. Field dependence of the initiation time of electrical trees in polymer insulation / V. V. Kiselevich // Physics of Complex Systems. – 2024. – Vol. 5, № 4. – P. 187–194.

6–А. Киселевич, В. В. Электрическая долговечность полимеров с точки зрения теории катастроф / В. В. Киселевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2025. – Т. 18, № 2. – С. 93–108.

7–А. Киселевич, В. В. Применение теории катастроф для описания температурных зависимостей пробивной напряжённости полимерных диэлектриков / В. В. Киселевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2026. – Т. 19, № 1. – С. 43–61.

8–А. Киселевич, В. В. Взаимосвязь характеристических температур процессов стеклования и электрического разрушения полимеров / В. В. Киселевич // Полимерные материалы и технологии. – 2026. – Т. 12, № 1. – С. 71–82.

9–А. Киселевич, В. В. Оценка показателей надёжности силовых кабелей с бумажной и полиэтиленовой изоляцией / В. В. Киселевич // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 85–92.

10–А. Шабловский, Я. О. Прогнозирование ресурсных характеристик полимерной электрической изоляции / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Полимерные материалы и технологии. – 2026. – Т. 12, № 2. – С. 27–35.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

11–А. Шабловский, Я. О. Предупреждение пожароопасных отказов силовых кабелей / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: материалы междунар. конф. молодых

учёных, г. Минск, 28 ноября 2013 г. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси; ред.: Ю. С. Иванов [и др.]. – г. Минск, 2013. – С. 169–172.

12–А. Шабловский, Я. О. Количественные показатели надёжности электрической изоляции / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // Технологія-2015: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Сєвєродонецьк, 17–18 квітня 2015 р. / Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля; укл.: В. Ю. Тарасов. – м. Сєвєродонецьк, 2015. – Ч. II, С. 21–23.

13–А. Киселевич, В. В. Математическая модель электрической прочности полимерных диэлектриков / В. В. Киселевич // Новые материалы и перспективные технологии: сб. материалов VI междисциплинарного научн. форума с междунар. участием, г. Москва, 23–27 ноября 2020 г. / РАН. – г. Москва, 2020. – Т. 2, С. 109–110.

Тезисы докладов научных конференций

14–А. Киселевич, В. В. Вероятностная модель старения полимерной изоляции / В. В. Киселевич // Полимерные композиты и трибология–2013: тез. докл. междунар. научн.-техн. конф., г. Гомель, 24–27 июня 2013 г. / ИММС НАН Беларуси; ред.: И. Н. Ковалёва [и др.]. – г. Гомель, 2013. – С. 239.

15–А. Киселевич, В. В. Математическая модель отказа полимерной изоляции / В. В. Киселевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: тез. докл. междунар. научн.-техн. конф., г. Могилёв, 30–31 октября 2013 г. / ГУВПО «Белорусско-российский университет»; ред.: И. С. Сазонов [и др.]. – г. Могилёв, 2013. – С. 181.

16–А. Киселевич, В. В. Температурная зависимость равновесной координаты химического превращения полимерных стеклообразующих веществ / В. В. Киселевич // Физикохимия процессов переработки полимеров: тез. докл. VI Всероссийской научн. конф. (с междунар. участием), г. Иваново, 3–7 октября 2016 г. / ИХР РАН. – г. Иваново, 2016. – С. 41.

17–А. Киселевич, В. В. Оценка положения точек стеклообразования на размытых температурных зависимостях / В. В. Киселевич // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. IV Республиканской научн.-технич. конф. молодых учёных, г. Гомель, 10–11 ноября 2016 г. / ИММС НАН Беларуси. – г. Гомель, 2016. – С. 65–66.

18–А. Киселевич, В. В. Температурные зависимости параметров структурно-химического превращения аморфных полимеров / В. В. Киселевич // Физикохимия полимеров и процессов их переработки: тез. докл. VII Всероссийской научн. конф. (с междунар. участием), г. Иваново, 16–20 сентября 2019 г. / ИХР РАН. – г. Иваново, 2019. – С. 90.

19–А. Киселевич, В. В. Оценка параметров структурно-химического превращения стереоизомеров полипропилена / В. В. Киселевич // Физикохимия полимеров и процессов их переработки: тез. докл. VII Всероссийской научн. конф. (с междунар. участием), г. Иваново, 16–20 сентября 2019 г. / ИХР РАН. – г. Иваново, 2019. – С. 95.

20–А. Киселевич, В. В. Функции электрической прочности полимерных диэлектриков / В. В. Киселевич // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: тез. докл. XVII Международной научн.-практ. конф., г. Нальчик, 5–10 июля 2021 г. / КБГУ им. Х. М. Бербекова; редкол.: С. Ю. Хаширова [и др.]. – г. Нальчик, 2021. – С. 108.

21–А. Киселевич, В. В. Оценка времени образования электрических дендритов в полимерной изоляции / В. В. Киселевич // Диэлектрики-2024: тез. докл. XVI Международной конференции по физике диэлектриков, г. Санкт-Петербург, 2–4 октября 2024 г. / РГПУ им. А. И. Герцена. – г. Санкт-Петербург, 2024. – С. 64.

22–А. Киселевич, В. В. Зависимость сопротивления электрической изоляции от времени старения / В. В. Киселевич // Диэлектрики-2024: тез. докл. XVI Международной конференции по физике диэлектриков, г. Санкт-Петербург, 2–4 октября 2024 г. / РГПУ им. А. И. Герцена. – г. Санкт-Петербург, 2024. – С. 65.

23–А. Киселевич, В. В. Полевая зависимость электрической долговечности полимерных диэлектриков / В. В. Киселевич // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2025): тез. докл. междунар. научн.-техн. конф., г. Гомель, 24–27 июня 2025 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол.: В. Н. Адериха [и др.]. – г. Гомель, 2025. – С. 161.

24–А. Киселевич, В. В. Температурная зависимость пробивной напряжённости полимерных диэлектриков / В. В. Киселевич // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2025): тез. докл. междунар. научн.-техн. конф., г. Гомель, 24–27 июня 2025 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол.: В. Н. Адериха [и др.]. – г. Гомель, 2025. – С. 162.

Патент на изобретение

25–А. Патент BY 19315, МПК G01R 31/00 (2006.01). Способ определения остаточного ресурса электрической изоляции электроустановки: № a 20121289: заявл. 07.09.2012: опубл. 30.08.2015 / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич; заявитель Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого». – 4 с.

РЭЗЮМЭ

Кісялевіч Валянцін Уладзіміравіч

Прагназаванне эксплуатацыйнай даўгавечнасці палімерных электраізаляцыйных матэрыялаў пры ўздзеянні электрычнага поля і тэмпературы

Ключавыя словы: палімерныя матэрыялы, электрычная ізаляцыя, прабой, электрычная трываласць, эксплуатацыйная даўгавечнасць, надзейнасць, рэсурс ізаляцыі, структурныя асаблівасці палімераў

Мэта даследавання – выяўленне заканамернасцей уплыву напружанасці электрычнага поля і тэмпературы на электрычную трываласць і даўгавечнасць палімерных ізаляцыйных матэрыялаў з распрацоўкай на гэтай аснове методыкі ацэнкі тэхнічнага стану і прагназавання рэшткавага рэсурсу ізаляцыі сілавых кабеляў.

Метады даследавання: стандартныя метады вызначэння электрычных характарыстык, метады тэорыі катастроф, карэляцыйнага аналізу, тэорыі надзейнасці, графічнага аналізу статыстычных даных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Прапанаваны аналітычныя выразы палявой залежнасці электрычнай даўгавечнасці і тэмпературнай залежнасці прабойнай напружанасці палімерных матэрыялаў, заснаваныя на суадносінах для функцый катастроф складкі і зборкі, якія задаюцца шэрагамі Тэйлара трэцяга і чацвёртага парадкаў. Выяўлена, што крытычная напружанасць электрычнага прабою ўзрастае пры памяншэнні гнуткасці палімернага ланцуга і павелічэнні памеру бакавых груп і ступені палярнасці палімера. Устаноўлена карэляцыйная залежнасць гэтай напружанасці ад энергіі актывацыі рэлаксацыйных пераходаў у палімерных матэрыялах. Пабудавана матэматычная мадэль, якая апісвае надзейнасць палімернай электрычнай ізаляцыі сілавых кабеляў на працяглым інтэрвале часу эксплуатацыі. Распрацавана методыка прагназавання паказчыкаў эксплуатацыйнай даўгавечнасці электрычнай ізаляцыі, якая спрыяе зніжэнню працаёмкасці працэсу неразбуральнай дыягностыкі кабеляў. Навуковая навізна вынікаў заключаецца ва ўстанаўленні фізічных заканамернасцей паводзін палімерных ізаляцыйных матэрыялаў у моцным электрычным полі з пазіцый матэматычнай тэорыі катастроф.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследавання могуць быць скарыстаны пры ацэнцы электрычнай трываласці і даўгавечнасці палімерных матэрыялаў, вызначэнні паказчыкаў надзейнасці і дыягностыцы тэхнічнага стану ізаляцыі электрычных кабеляў.

Галіна ўжывання: электратэхніка, электраэнергетыка, тэхналогіі дыягностыкі і неразбуральнага кантролю палімернай ізаляцыі кабеляў.

РЕЗЮМЕ

Киселевич Валентин Владимирович

Прогнозирование эксплуатационной долговечности полимерных электроизоляционных материалов при воздействии электрического поля и температуры

Ключевые слова: полимерные материалы, электрическая изоляция, пробой, электрическая прочность, эксплуатационная долговечность, надёжность, ресурс изоляции, структурные особенности полимеров

Цель исследования – выявление закономерностей влияния напряжённости электрического поля и температуры на электрическую прочность и долговечность полимерных изоляционных материалов с разработкой на этой основе методики оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса изоляции силовых кабелей.

Методы исследования: стандартные методы определения электрических характеристик, методы теории катастроф, корреляционного анализа, теории надёжности, графического анализа статистических данных.

Полученные результаты и их новизна. Предложены аналитические выражения полевой зависимости электрической долговечности и температурной зависимости пробивной напряжённости полимерных материалов, основанные на соотношениях для функций катастроф складки и сборки, задаваемых рядами Тейлора третьего и четвёртого порядков. Выявлено, что критическая напряжённость электрического пробоя возрастает при уменьшении гибкости полимерной цепи и увеличении размера боковых групп и степени полярности полимера. Установлена корреляционная зависимость этой напряжённости от энергии активации релаксационных переходов в полимерных материалах. Построена математическая модель, описывающая надёжность полимерной электрической изоляции силовых кабелей на длительном интервале времени эксплуатации. Разработана методика прогнозирования показателей эксплуатационной долговечности электрической изоляции, способствующая снижению трудоёмкости процесса неразрушающей диагностики кабелей. Научная новизна результатов состоит в установлении физических закономерностей поведения полимерных изоляционных материалов в сильном электрическом поле с позиций математической теории катастроф.

Рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы при оценке электрической прочности и долговечности полимерных материалов, определении показателей надёжности и диагностике технического состояния изоляции электрических кабелей.

Область применения: электротехника, электроэнергетика, технологии диагностики и неразрушающего контроля полимерной изоляции кабелей.

SUMMARY

Valentin V. Kiselevich

Predicting the Service Life of Polymer Electrical Insulating Materials Under Electric Field and Temperature Exposure

Keywords: polymer materials, electrical insulation, breakdown, electric strength, service life, reliability, insulation life, structural features of polymers

The purpose of the research is to identify patterns in the effects of electric field strength and temperature on the electric strength and lifetime of polymer insulating materials and, on this basis, to develop a method for assessing the condition and predicting the remaining insulation life of power cables.

Research methods: standard methods for determining electrical characteristics, methods of catastrophe theory, correlation analysis, reliability theory, and graphical analysis of statistical data.

Results and their novelty. Analytical expressions of the electrical lifetime field dependence and the temperature dependence of breakdown strength of polymer materials based on the relations for the functions of fold and cusp catastrophes defined by Taylor series of the third and fourth orders have been obtained. It has been found that the critical electric breakdown field strength of increases with decreasing flexibility of the polymer chain and increasing size of side groups and the degree of polymer polarity. The correlation dependence of this field strength on the activation energy of relaxation transitions in polymer materials has been found. A mathematical model has been constructed describing the reliability of polymer electrical insulation of power cables over a long period of operation. A method for predicting the service life parameters of electrical insulation has been developed, which helps to reduce the complexity of non-destructive testing of cables. The scientific novelty of the research consists in establishing the physical laws of the behavior of polymer insulating materials in a strong electric field from the standpoint of the catastrophe theory.

Recommendations for use. The results of the research can be used to assess the electric strength and lifetime of polymer materials, determine the reliability parameters and diagnose the condition of electrical cable insulation.

Field of application: electrical engineering, electric power industry, diagnostic technologies, and non-destructive testing of polymer cable insulation.

Научное издание

Киселевич Валентин Владимирович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Подписано в печать 26.10.2026 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная № 1. Гарнитура Таймс. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,7. Тираж 60 экз. Зак. № 11-26

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а
Свидетельство о государственной регистрации издателя
№ 1/244 от 25.03.2014 г.