

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к второму изданию	9
Предисловие к первому изданию	12
Глава 1	
ВВЕДЕНИЕ	13
1.1. Производство и передача электрической энергии	13
1.2. Рабочее напряжение. Перенапряжения	17
1.3. Испытательные напряжения	17
1.3.1. Испытание напряжением промышленной частоты	18
1.3.2. Испытание грозowymi импульсами напряжения	18
1.3.3. Испытание коммутационными импульсами	18
1.3.4. Постоянное напряжение	19
1.3.5. Испытания очень низкочастотным напряжением	19
<i>Литература</i>	20
Глава 2	
ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ	21
2.1. Постоянное напряжение	22
2.1.1. Преобразование переменного напряжения в постоянное	23
2.1.2. Электростатические генераторы	35
2.2. Переменное напряжение	40
2.2.1. Испытательные трансформаторы	42
2.2.2. Резонансные испытательные установки	48
2.3. Импульсные напряжения	56
2.3.1. Схемы генераторов импульсных напряжений	59
2.3.2. Конструкции импульсных генераторов	71
2.4. Системы управления и контроля	77
<i>Литература</i>	77
Глава 3	
ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПЯЖЕНИЙ	80
3.1. Измерения максимальных напряжений с помощью искровых разрядников	82



3.1.1. Шаровые разрядники	82
3.1.2. Эталонные измерительные системы	93
3.1.3. Разрядники с однородным полем	95
3.1.4. Стержневые разрядники	95
3.2. Электростатические вольтметры	97
3.3. Добавочные резисторы с микроамперметрами. Делители напряжения с высокоомными резисторами	99
3.4. Роторные вольтметры и флюксометры	109
3.5. Измерение максимальных значений напряжения	111
3.5.1. Метод Чуба—Фортескью	112
3.5.2. Делители напряжения и пассивные выпрямительные цепи	114
3.5.3. Активные схемы с пиковым считыванием	118
3.5.4. Конденсаторы высокого напряжения для измерительных схем	120
3.6. Измерение импульсных напряжений с помощью делителей	129
3.6.1. Принципы генерации напряжения и обобщенная измерительная цепь	130
3.6.2. Требования к передаточным характеристикам измерительной системы	133
3.6.3. Основы вычислений в измерительной системе	141
3.6.4. Делители напряжения	147
3.6.5. Связь между параметрами делителя напряжения и его выводов	163
3.6.6. Плечо низкого напряжения делителя	170
3.7. Быстрые цифровые регистраторы переходных процессов для импульсных измерений	174
3.7.1. Принципы и историческое развитие цифровых регистраторов переходных процессов	176
3.7.2. Собственные ошибки в цифровых регистраторах	179
3.7.3. Характеристики аналого-цифровых регистраторов и параметры, требуемые при испытаниях высокими напряжениями	183
3.7.4. Тенденции	195
<i>Литература</i>	196

Глава 4

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ

4.1. Распределение напряженности электрического поля и пробивные напряжения изоляционного материала	201
4.2. Поля в однородных изотропных материалах	205
4.2.1. Электродные конфигурации с однородным полем	206
4.2.2. Коаксиальные цилиндрические и сферические поля	209
4.2.3. Электродные системы шар—шар и шар—плоскость	214
4.2.4. Два параллельных цилиндрических провода	218
4.2.5. Искажения поля проводящими элементами	221



4.3. Поля в комбинированных изоляционных системах из изотропных материалов	226
4.3.1. Простые конфигурации	226
4.3.2. Диэлектрическое преломление	230
4.3.3. Регулирование напряженности поля с помощью экранов с плавающим потенциалом	233
4.4. Численные методы	239
4.4.1. Метод конечных разностей (МКР)	240
4.4.2. Метод конечных элементов (МКЭ)	244
4.4.3. Метод эквивалентных зарядов (МЭЗ)	254
4.4.4. Метод граничных элементов (МГЭ)	266
<i>Литература</i>	275

Глава 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В ГАЗАХ	278
5.1. Законы классического газа	278
5.1.1. Распределение молекул по скоростям	282
5.1.2. Длина свободного пробега молекул и электронов	284
5.1.3. Распределение длин свободного пробега	287
5.1.4. Передача энергии при столкновении	288
5.2. Процессы ионизации и разрушения	291
5.2.1. Коэффициент первичной ионизации Таунсенда	293
5.2.2. Фотоионизация	297
5.2.3. Ионизация взаимодействием метастабилей с атомами	298
5.2.4. Термическая ионизация	299
5.2.5. Рекомбинация	299
5.2.6. Формирование отрицательного иона при прилипанию	301
5.2.7. Подвижность ионов и деионизация диффузией	307
5.2.8. Соотношение между диффузией и подвижностью	311
5.3. Вторичные эффекты на катоде	313
5.3.1. Фотоэлектрическая эмиссия	314
5.3.2. Эмиссия электронов с катода положительными ионами и возбужденными атомами	314
5.3.3. Термоионная эмиссия	315
5.3.4. Автоэлектронная эмиссия	316
5.3.5. Коэффициент вторичной ионизации Таунсенда	318
5.3.6. Вторичная фотоионизация	319
5.4. Переход от несамоподдерживающего разряда к самостоятельному пробою	321
5.4.1. Механизм Таунсенда	321
5.5. Стримерный механизм разряда	323
5.6. Закон Пашена	329
5.7. Эффект Пеннинга	335
5.8. Разрядная напряженность поля E_0	336



5.9. Пробой в неоднородных полях	338
5.10. Влияние прилипания электронов на критерии пробоя	340
5.11. Частичный пробой, коронные разряды	344
5.11.1. Положительные, или анодные, короны	344
5.11.2. Отрицательная (катодная) корона	347
5.12. Эффект полярности — влияние объемного заряда	348
5.13. Повышение разрядного напряжения при малых временах воздействия	353
5.13.1. Пробой при импульсных напряжениях	354
5.13.2. Вольт-секундные характеристики	355
5.13.3. Экспериментальные исследования времени запаздывания	356
<i>Литература</i>	359

Глава 6

ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

6.1. Пробой в твердых диэлектриках	361
6.1.1. Внутренний пробой твердого диэлектрика	363
6.1.2. Лавинный пробой	366
6.1.3. Электромеханический пробой	367
6.1.4. Разряд у острых кромок и образование дендритов	368
6.1.5. Тепловой пробой	370
6.1.6. Электрохимическое старение	375
6.1.7. Трекинг	378
6.2. Пробой в жидкостях	379
6.2.1. Ударный механизм	380
6.2.2. Механизм пробоя при наличии взвешенных твердых частиц	381
6.2.3. Разряд в газовых включениях	384
6.2.4. Электроконвекционная и электродинамическая модели пробоя жидких диэлектриков	384
6.3. Статическая электризация в силовых трансформаторах	386
<i>Литература</i>	388

Глава 7

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

7.1. Динамические свойства диэлектриков	389
7.1.1. Динамические свойства во временной области	392
7.1.2. Динамические свойства в частотной области	398
7.1.3. Моделирование диэлектрических параметров	400
7.1.4. Применения старения изоляции	403
7.2. Измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости	405
7.2.1. Мост Шеринга	406
7.2.2. Токовые компараторные мосты	410
7.2.3. Измерение $\tan \delta$	412
7.2.4. Нулевые детекторы	413



7.3. Измерения частичных разрядов	414
7.3.1. Основная схема возникновения ЧР	416
7.3.2. Токи, вызванные ЧР	420
7.3.3. Измерительные системы в схемах тестирования ЧР	422
7.3.4. Измерительные системы регистрации кажущегося заряда	425
7.3.5. Источники помех и снижение их уровня	438
7.3.6. Использование цифровых устройств для обнаружения ЧР	441
7.3.7. Калибровка детекторов ЧР в полной испытательной схеме	443
7.3.8. Цифровые приборы для измерения характеристик ЧР	444
<i>Литература</i>	447

Глава 8

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, КООРДИНАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

450

8.1. Физические процессы грозового разряда	450
8.1.1. Энергия молнии	454
8.1.2. Опасность поражения молнией	455
8.2. Электрическая прочность воздушных промежутков и гирлянд изоляторов при грозовых импульсах	455
8.3. Разрядные напряжения различных промежутков при коммутационных напряжениях	458
8.4. Лабораторные испытания при высоких напряжениях и статистическая обработка результатов	461
8.4.1. Воздействие на диэлектрик напряжения промышленной частоты	462
8.4.2. Характеристики изоляционного материала	462
8.4.3. Случайный характер появления разряда	462
8.4.4. Виды изоляционных материалов	463
8.4.5. Типы воздействий, используемых при испытаниях объектов высоким напряжением	463
8.4.6. Погрешности и доверительный интервал	468
8.4.7. Процедуры лабораторных испытаний	468
8.4.8. Стандартные процедуры испытаний	472
8.4.9. Испытание напряжением промышленной частоты	473
8.4.10. Распределение измеренных вероятностей пробоя (уверенность при измерении $P(U)$)	473
8.4.11. Доверительные интервалы в вероятности пробоя	476
8.5. Значимость измеренных вероятностей пробоя	477
8.5.1. Подбор наилучшего нормального распределения	477
8.6. Координация изоляции	479
8.6.1. Уровень изоляции	480
8.6.2. Статистический подход к координации изоляции	483
8.6.3. Связь между уровнями изоляции и защиты	486
8.7. Современные устройства защиты энергетических систем	487
8.7.1. Металлооксидные ограничители перенапряжений	487
<i>Литература</i>	494



Глава 9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ	496
9.1. Работа в загрязненной среде	496
9.2. Механизм поверхностного пробоя изоляторов при переменном и постоянном напряжениях	497
9.2.1. Модель поверхностного разряда загрязненных изоляторов	498
9.3. Измерения и испытания	499
9.3.1. Определение длины утечки изоляторов	500
9.3.2. Определение степени загрязнения	502
9.3.3. Испытание загрязнения	502
9.3.4. Процедура загрязнения при испытании чистым туманом	505
9.3.5. Процедура испытания чистым туманом	505
9.3.6. Характеристики тумана	506
9.4. Снижение поверхностных пробоев из-за загрязнения	506
9.4.1. Использование изоляторов оптимизированных форм	507
9.4.2. Периодическая чистка	507
9.4.3. Покрытие смазкой	507
9.4.4. Покрытие с вулканизацией при комнатной температуре	507
9.4.5. Изоляторы с резистивной глазурью	508
9.4.6. Применение некерамических изоляторов	509
9.5. Конструкции изоляторов	509
9.5.1. Керамические изоляторы	512
9.5.2. Полимерные изоляторы	512
9.6. Испытания и спецификации	515
9.6.1. Обследование при работе и режимы отказов	516
<i>Литература</i>	<i>517</i>