

М.В. Дмитриев

**КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2021

УДК 621.315.23

ББК 31.2

Д53

Дмитриев М.В.

Кабельные линии высокого напряжения / М.В. Дмитриев. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 688 с.

Рассмотрены вопросы проектирования, строительства, эксплуатации кабельных линий переменного тока напряжением до 500 кВ, выполненных кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, однофазной или трехфазной конструкции.

Книга предназначена для сотрудников проектных организаций и электросетевых компаний, а также для студентов вузов по направлению «Электроэнергетика».

ISBN 978-5-7422-7372-1

© Дмитриев М.В., 2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание современных, надежных, эффективных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена невозможно, если оно опирается на нормативные документы и методики, действующие для кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией.

К сожалению, разработка и утверждение необходимых норм, учитывающих все особенности нового поколения кабелей, отстает на 5-10 лет, и за это время были сданы в эксплуатацию десятки объектов, где приняты неоптимальные и иногда даже опасные технические решения, результатом которых стал значительный экономический ущерб сетевым компаниям, а также угроза жизни и здоровью людей. Не менее важно и то, что отставание на 5-10 лет затрудняет возможность своевременно дать дорогу инновациям.

Следует понимать, что ускорение стандартизации, безусловно, полезно, однако не позволит решить всех проблем, ведь в разработке документов обычно принимает участие только узкий круг специалистов, мнение которых далеко не всегда является единственно верным. Кроме того, стандарты, из-за своей краткости, не могут вместить всех методик расчета, необходимых проектировщикам, а также обычно не содержат пояснений о причинах конкретных требований/ограничений/правил.

Обстоятельства, указанные выше, привели автора к подготовке и публикации книги, посвященной кабельным линиям высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Книга опирается на собственные исследования автора, выполненные им за последние несколько лет, и поэтому не содержит списка литературы. Кроме того, в книге нет ссылок на нормативные документы, поскольку в нормах многие вопросы или вообще не отражены, или отражены без должных пояснений.

Материал книги предназначен для широкой аудитории, изложен максимально доступным языком и включает только те математические выражения, где нет ничего сложнее квадратного корня и натурального логарифма. Прочитав книгу:

- студенты вузов узнают об актуальных проблемах кабельных линий;
- сотрудники проектных организаций найдут простые и понятные методики расчетов, позволяющие выбрать оптимальные технические решения и наполнить разумной аргументацией конкретные разделы проектной документации (проект не является убедительным, если опирается лишь на результаты использования компьютерных программ, даже лицензированных и/или дорогостоящих);
- сотрудники электросетевых компаний получают возможность уточнить проводимую ими техническую политику и найти обоснование для внедрения в кабельных сетях инновационного оборудования.

По любым вопросам, которые возникнут при ознакомлении с книгой, Вы всегда можете написать автору, используя контактные данные с сайта www.mvdm.ru

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КЛ	
Глава 1.1. Основные термины и определения	14
1.1.1. Кабель и провод	14
1.1.2. Кабельная линия и кабельная арматура	14
1.1.3. Кабельная система	17
1.1.4. Краткая классификация КЛ	18
Глава 1.2. Электрический кабель	20
1.2.1. Однофазный кабель. Жила	20
1.2.2. Однофазный кабель. Изоляция	23
1.2.3. Однофазный кабель. Экран	27
1.2.4. Однофазный кабель. Оболочка	31
1.2.5. Однофазный кабель. Броня	37
1.2.6. Трехфазная группа однофазных кабелей	39
1.2.7. Трехфазный кабель	42
1.2.8. Маркировка кабеля	46
1.2.9. Строительная длина кабеля	48
1.2.10. Заземление экранов кабеля	53
Глава 1.3. Кабельные муфты	55
1.3.1. Концевые муфты 6-35 кВ	55
1.3.2. Соединительные муфты 6-35 кВ	59
1.3.3. Концевые муфты 110-500 кВ	63
1.3.4. Соединительные муфты 110-500 кВ	70
1.3.5. Специальные типы муфт	74
ЧАСТЬ 2. ПАРАМЕТРЫ КЛ	
Глава 2.1. Геометрические параметры	75
2.1.1. Однофазный кабель	75
2.1.2. Трехфазная группа однофазных кабелей	76
2.1.3. Трехфазный кабель	78
Глава 2.2. Электрические параметры	80
2.2.1. Продольные и поперечные параметры	80
2.2.2. Прямая, обратная, нулевая последовательность	81
2.2.3. Сосредоточенные и волновые параметры	85
Глава 2.3. Продольные параметры	88
2.3.1. Активное сопротивление жилы и экрана	88
2.3.2. Параметры земли	90

2.3.3. Собственная и взаимная индуктивность жилы и экрана	92
2.3.4. Сопротивление прямой и нулевой последовательности	94
2.3.5. Простые выражения для параметров прямой последовательности	97
2.3.6. Пример расчета продольных сопротивлений	103
2.3.7. Продольные параметры трехфазных кабелей	107
2.3.8. Особенности многоцепных КЛ	109
Глава 2.4. Поперечные параметры	118
2.4.1. Емкость изоляции	118
2.4.2. Активная проводимость и время саморазряда емкости изоляции	120
Глава 2.5. Волновые параметры	123
2.5.1. Волновой характер процессов и скорость волны	123
2.5.2. Волновое сопротивление	129
ЧАСТЬ 3. ЗАЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ КЛ	
Глава 3.1. Токи в экранах в нормальном режиме работы	136
3.1.1. Емкостные токи в экранах	136
3.1.2. Индуктивные (наведенные) токи в экранах	138
3.1.3. Измерение токов в экранах	144
3.1.4. Отличия однофазных и трехфазных кабелей	146
Глава 3.2. Способы ограничения токов в экранах	147
3.2.1. Снижение сечения экранов	147
3.2.2. Снижение расстояния между фазами	149
3.2.3. Одностороннее заземление экранов	150
3.2.4. Транспозиция экранов	154
Глава 3.3. Расчет токов и напряжений в экранах	159
3.3.1. Расчет режимов методом симметричных составляющих	159
3.3.2. Основные случаи для расчета напряжений и токов в экранах	165
3.3.3. Расчет напряжений, наведенных в экранах	167
3.3.4. Расчет токов, наведенных в экранах	173
3.3.5. Особенности многоцепных КЛ	176
3.3.6. Расчет токов, наведенных в экранах в несимметричных режимах	179
Глава 3.4. Расчет потерь в экранах	182
3.4.1. Расчет потерь в экранах	182
3.4.2. Коэффициент использования пропускной способности	185
3.4.3. Стоимость потерь в экранах	186
Глава 3.5. Допустимые величины и примеры расчета	188
3.5.1. Допустимые токи в экранах	188

3.5.2. Допустимые потери в экранах и критерии выбора схемы	189
3.5.3. Допустимые напряжения на экранах	192
3.5.4. Примеры выбора схемы заземления экранов	194
ЧАСТЬ 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ КЛ	
Глава 4.1. Эквипотенциальная шина	198
4.1.1. Назначение шины и ее расчет	198
4.1.2. Пример выбора шины	204
Глава 4.2. Неидеальная транспозиция экранов	207
4.2.1. Неидеальная транспозиция экранов	207
4.2.2. Расчет неидеальной транспозиции	210
4.2.3. Расчет коэффициента транспозиции экранов	214
4.2.4. Обустройство узла сопряжения соседних циклов транспозиции	216
4.2.5. Расстановка муфт вдоль трассы и неполная транспозиция	218
4.2.6. Пример расчета неидеальной транспозиции	221
Глава 4.3. Неравномерность токов в экранах	226
4.3.1. Контроль токов в экранах	226
4.3.2. Составляющие токов в экранах	230
4.3.3. Неравномерность для схем без транспозиции экранов	232
4.3.4. Понятие группы транспозиции экранов	235
4.3.5. Неравномерность для схем с транспозицией экранов	238
Глава 4.4. Заземление брони	247
4.4.1. Основные схемы соединения брони	247
4.4.2. Расчет двустороннего заземления брони	250
4.4.3. Расчет альтернативных схем для брони	251
4.4.4. Пример расчета для бронированного кабеля	254
ЧАСТЬ 5. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И НЕВОЗГОРАЕМОСТЬ КЛ	
Глава 5.1. Основные влияющие факторы	258
5.1.1. Постановка задачи	258
5.1.2. Место КЗ	260
5.1.3. Вид КЗ	262
5.1.4. Величина тока КЗ	267
5.1.5. Длительность КЗ	269
5.1.6. Предельная температура жилы и экрана	275
Глава 5.2. Методика расчета стойкости токам КЗ	277
5.2.1. Расчет для периодической составляющей тока КЗ	277

5.2.2. Примеры расчета стойкости токам КЗ	283
5.2.3. Учет апериодической составляющей тока КЗ	287
5.2.4. Постоянная времени нагрева/охлаждения при КЗ	290
5.2.5. Температура элементов кабеля после КЗ	295
Глава 5.3. Способы повышения стойкости токам КЗ	301
5.3.1. Уточнение исходных данных	301
5.3.2. Объединение (скрутка) экранов	306
5.3.3. Токовая шина	315
ЧАСТЬ 6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КЛ И ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ЖИЛЫ	
Глава 6.1. Основные влияющие факторы	318
6.1.1. Постановка задачи выбора сечения жилы	318
6.1.2. Выбор сечения жилы с учетом потерь в экранах	320
6.1.3. Последовательность выбора КЛ	323
6.1.4. Основные влияющие факторы	325
6.1.5. Допустимый ток жилы и система поправочных коэффициентов	328
6.1.6. Величина тока в жиле для теплового расчета	330
6.1.7. Учет суточного графика нагрузки	334
Глава 6.2. Методика расчета для прокладки в грунте	336
6.2.1. Расчет для однофазного кабеля	336
6.2.2. Расчет для трехфазной группы однофазных кабелей	340
6.2.3. Расчет для трехфазного кабеля	343
Глава 6.3. Методика расчета для прокладки в трубах	346
6.3.1. Расчет для однофазного кабеля	346
6.3.2. Расчет для трехфазной группы однофазных кабелей	350
6.3.3. Расчет для трехфазного кабеля	352
Глава 6.4. Методика расчета для прокладки на воздухе	354
6.4.1. Расчет для однофазного кабеля	354
6.4.2. Расчет для трехфазной группы однофазных кабелей	355
6.4.3. Расчет для трехфазного кабеля	358
Глава 6.5. Сводная информация и примеры расчета	359
6.5.1. Расчет температуры элементов кабеля	359
6.5.2. Расчет длительного допустимого тока жилы	363
6.5.3. Пример системы поправочных коэффициентов для КЛ 110 кВ	365
6.5.4. Пример расчета для однофазных кабелей 10 кВ	373
6.5.5. Пример расчета для трехфазного кабеля 10 кВ	376

ЧАСТЬ 7. ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ СЕТИ И РАБОТА ЗАЩИТ

Глава 7.1. Заземление нейтрали сети	377
7.1.1. Основные способы обустройства нейтрали	377
7.1.2. Предпосылки для отказа от изолированной нейтрали	380
7.1.3. Процессы в сети с изолированной нейтралью	383
7.1.4. Процессы в сети с компенсированной нейтралью	391
7.1.5. Процессы в сети с резистивно-заземленной нейтралью	394
7.1.6. Особенности однофазных и трехфазных кабелей	398
Глава 7.2. Токи нулевой последовательности	401
7.2.1. Токи нулевой последовательности в нормальном режиме	401
7.2.2. Расчет токов одноцепной КЛ	402
7.2.3. Расчет токов двухцепной КЛ	405
Глава 7.3. Защита на основе мониторинга температуры	409
7.3.1. Различные системы online мониторинга кабелей	409
7.3.2. Опыт применения мониторинга температуры	409
7.3.3. Роль мониторинга температуры при выборе кабелей	411
7.3.4. Тепловая защита КЛ	413

ЧАСТЬ 8. КЛ С РЕАКТОРАМИ

Глава 8.1. Причины оснащения линий реакторами	416
8.1.1. Основные виды реакторов	416
8.1.2. Баланс реактивной мощности линии	419
8.1.3. Коэффициент компенсации зарядной мощности	421
8.1.4. Допустимое повышение напряжения на изоляции оборудования	422
8.1.5. Режим одностороннего питания	423
8.1.6. Режим двустороннего питания	427
8.1.7. Линейные и шинные ШР	428
8.1.8. Протяженные КЛ	430
Глава 8.2. Установившиеся режимы работы	432
8.2.1. Основные параметры, необходимые для проведения расчетов	432
8.2.2. Особенности КЛ разных классов напряжения	436
8.2.3. Режим «холостого хода»: напряжение в конце линии	438
8.2.4. Режим «холостого хода»: ток и мощность в начале линии	442
8.2.5. Режим передачи мощности: расчет для выделенной нагрузки	445
8.2.6. Режим передачи мощности: расчет для межсистемной линии	449
8.2.7. Режим передачи мощности: пример расчета	451
8.2.8. Предельная длина КЛ переменного тока	461

Глава 8.3. Аперiodические токи	462
8.3.1. Причины возникновения аперiodических токов	462
8.3.2. Пример расчета аперiodических токов	465
8.3.3. Безопасный коэффициент компенсации	469
8.3.4. Способы защиты от аперiodических токов	474
8.3.5. Выбор способа защиты от аперiodических токов	479
Глава 8.4. Резонансные явления	480
8.4.1. Причины возникновения резонансных явлений	480
8.4.2. Резонансные перенапряжения в неполнофазных режимах	481
 ЧАСТЬ 9. КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ	
Глава 9.1. Автоматическое повторное включение	482
9.1.1. Кабельно-воздушные линии	482
9.1.2. Назначение АПВ	483
9.1.3. Особенности АПВ	485
9.1.4. Селективное АПВ	488
9.1.5. Рекомендации по АПВ	495
Глава 9.2. Переходные пункты кабельно-воздушных линий	496
9.2.1. Виды ПП	496
9.2.2. Состав оборудования ПП	498
9.2.3. Требования к заземлению ПП	501
Глава 9.3. Универсальный самонесущий кабель	509
9.3.1. Кабельно-воздушные линии с универсальным кабелем	509
9.3.2. Заземление экранов и троса универсального кабеля	510
 ЧАСТЬ 10. ЗАЩИТА КЛ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ	
Глава 10.1. Перенапряжения и защита от них	513
10.1.1. Виды перенапряжений	513
10.1.2. Перенапряжения на изоляции кабелей	515
10.1.3. Напряжения на оболочке кабелей	518
Глава 10.2. Переходные процессы в жилах и выбор ОПН	519
10.2.1. Грозовые перенапряжения и защита от них	519
10.2.2. Коммутационные перенапряжения в типовых случаях	524
10.2.3. Коммутационные перенапряжения и ввод энергии в диэлектрик	532
10.2.4. Коммутационные перенапряжения для КЛ большой емкости	534
10.2.5. Коммутационные перенапряжения и потребность в ОПН	536
10.2.6. Коммутационные перенапряжения и свойства выключателей	539

10.2.7. Коммутационные перенапряжения и «переходный резонанс»	542
10.2.8. Выбор ОПН для защиты кабельных сетей	550
Глава 10.3. Переходные процессы в экранах и выбор ОПН	554
10.3.1. Переходные процессы и схема заземления экранов	554
10.3.2. Выбор экранных ОПН для защиты оболочки	557
10.3.3. Допустимое расстояние от экранных ОПН до муфт	561

ЧАСТЬ 11. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ КЛ

Глава 11.1. Магнитное поле КЛ	572
11.1.1. Электрическое и магнитное поле КЛ	572
11.1.2. МП однофазного кабеля	576
11.1.3. МП трехфазной группы однофазных кабелей	579
11.1.4. Допустимые значения напряженности МП	583
11.1.5. Расчеты для однофазных кабелей, уложенных в ряд	585
11.1.6. Расчеты для однофазных кабелей, уложенных треугольником	591
11.1.7. МП для двухцепных КЛ	595
Глава 11.2. Напряжение, наведенное на КЛ	598
11.2.1. Постановка задачи	598
11.2.2. Наводки от КЛ	603
11.2.3. Повышение безопасности путем заземления жил	611
11.2.4. Повышение безопасности путем транспозиции самих кабелей	615
11.2.5. Наводки от ВЛ	617
Глава 11.3. Сопротивление заземления узлов транспозиции	622
11.3.1. Проблема заземления узлов транспозиции	622
11.3.2. Шаговое напряжение	625
11.3.3. Методика расчета ЗУ	628
11.3.4. Пример расчета коэффициента заземления	633
11.3.5. Примеры выбора сопротивления ЗУ	635
Глава 11.4. Сопротивление заземления экранов	639
11.4.1. Сопротивление заземления экранов	639
11.4.2. Вынос потенциала по экранам КЛ	641

ЧАСТЬ 12. ПОЛИМЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ КЛ

Глава 12.1. Полимерные трубы	643
12.1.1. Технологии строительства КЛ в трубах	643
12.1.2. Основные правила размещения кабелей в трубах	647
12.1.3. Тепловые режимы КЛ в трубах	650

12.1.4. Основные требования к трубам	652
12.1.5. Классификация труб	654
Глава 12.2. Расчет полимерных труб	655
12.2.1. Выбор диаметра трубы	655
12.2.2. Прокладка труб в траншее	657
12.2.3. Прокладка труб методом ГНБ	660
12.2.4. Прокладка труб по конструкциям	664
Глава 12.3. Токопоисковые полимерные трубы	667
12.3.1. Проблемы испытаний и поиска повреждений кабелей в трубах	667
12.3.2. Поиск места повреждения изоляции. Предварительные методы	673
12.3.3. Поиск места повреждения изоляции. Точные методы	679
12.3.4. Особенности поиска места повреждения оболочки	681
12.3.5. Токопоисковые полимерные трубы	682
Глава 12.4. Полимерные узлы транспозиции экранов	683
12.4.1. Полимерные коробки	683
12.4.2. Полимерные колодцы	685
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	687

ВВЕДЕНИЕ

Линии электропередачи (ЛЭП) играют важнейшую роль в электроэнергетике, позволяя доводить электроэнергию от мест, где она вырабатывается, к местам, где она потребляется. Дополнительной задачей, возлагаемой на ЛЭП, является связь соседних энергосистем для их объединения на параллельную работу, что позволяет повысить надежность всей сети за счет взаимного резервирования отдельных ее частей.

Известны следующие основные варианты исполнения ЛЭП:

- воздушная линия электропередачи (ВЛ);
- кабельная линия электропередачи (КЛ);
- газоизолированная линия электропередачи (ГИЛ).

Мощность, передаваемая по ЛЭП, пропорциональна напряжению токоведущих частей относительно земли и току в них. Чтобы поднять напряжение на токоведущих частях, они должны быть надежно изолированы. Тип изоляции токоведущих частей является принципиальным отличием трех указанных вариантов исполнения ЛЭП:

- у ВЛ это обычный воздух при атмосферном давлении;
- у КЛ это твердая изоляция (полиэтилен, резина, бумага с пропиткой маслом);
- у ГИЛ это газ при повышенном давлении (элегаз SF_6 или его смесь с азотом).

Три варианта ЛЭП (ВЛ, КЛ, ГИЛ) отличаются и такими свойствами как:

- конструкция и габариты;
- степень влияния на внешний облик городов и на ландшафт местности;
- подверженность влиянию климатических факторов (ветер, осадки, гололед и др.);
- аварийность (число отключений в год и их средняя продолжительность);
- экологичность (уровень электрических и магнитных полей, последствия аварий);
- стоимость и сроки строительства, обслуживания, ремонта.

В настоящее время при создании ЛЭП использование ГИЛ из-за своей высокой стоимости почти не встречается, и в подавляющем большинстве приходится выбирать между ВЛ и КЛ. Если сравнивать ВЛ и КЛ, то в среднем строительство КЛ оказывается на порядок дороже, чем ВЛ, однако существуют ситуации, где без КЛ обойтись нельзя. Обычно применение КЛ происходит при следующих обстоятельствах:

- города, курортные зоны, заповедники, где стоимость земли настолько велика, что несмотря на дороговизну кабелей, в целом строительство КЛ окажется выгоднее, чем строительство ВЛ и обустройство охранной зоны вдоль ее трассы;
- крупные города, где нельзя строить ВЛ по эстетическим соображениям, а также с точки зрения электробезопасности населения;
- присоединение ВЛ к закрытым распределительным устройствам (РУ) станций и подстанций, когда нельзя выполнить ввод ВЛ внутрь здания через его стену, и тогда ввод делается при помощи короткой КЛ длиной всего до нескольких сотен метров, обустроенной на конце ВЛ (организация кабельного захода ВЛ в РУ);

- переход ВЛ через водные или любые иные преграды при помощи КЛ (организация кабельных вставок на ВЛ);
- выдача электрической мощности гидроэлектростанций (ГЭС) с плотины на берег при помощи КЛ (соединение блочных повышающих трансформаторов, которые расположены непосредственно на плотине, с РУ высокого напряжения на берегу);
- электроснабжение потребителей в сети собственных нужд электрических станций (циркуляционные, питательные и прочие насосы) с помощью КЛ;
- выполнение внутренней сети электроснабжения крупных производственных или перерабатывающих предприятий разных отраслей промышленности за счет КЛ.

Видно, что перечень случаев применения КЛ достаточно широк, и поэтому КЛ действительно важны и востребованы, а проблемы их создания требуют всестороннего углубленного изучения. С начала 20-го века повсеместно при строительстве новых КЛ и реконструкции старых используются, в основном, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена однофазной или трехфазной конструкции – именно им и посвящена книга.

Традиционно любые ЛЭП разделяют по классам номинального напряжения:

- низкое напряжение (менее 1 кВ);
- высокое напряжение (от 1 до 750 кВ).

Классификация в полной мере относится и к кабельным ЛЭП за исключением того, что на класс 750 кВ кабели применения не находят из-за повышенной сложности их производства, монтажа и обслуживания. Поэтому не стоит удивляться, что в книге рассматриваются КЛ высокого напряжения только до 500 кВ, причем переменного тока (КЛ постоянного тока в России отсутствуют и в обозримом будущем не планируются).

Итак, книга затрагивает вопросы проектирования, строительства, эксплуатации КЛ переменного тока высокого напряжения до 500 кВ, выполненных однофазными или трехфазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Несмотря на простоту предлагаемых методик расчета, их погрешность не превосходит 5%, что проверялось:

- компьютерным моделированием (в известных программах ЕМТР и СУМСАР);
- натурными экспериментами (в тех случаях, где это было возможно).

Дмитриев Михаил Викторович

**КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Подписано в печать 28.06.2021. Формат 70×100/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 55,5. Тираж 500. Заказ 1451.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.