



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт ИЭТЭ
Кафедра ЭШЭ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

Направление 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование)

Направленность (программа) Техническое и информационное

обеспечение построения и функционирования источников питания, сетей и объектов электрического хозяйства потребителей

Форма обучения очная
(очная/очно-заочная/заочная)

Тема: Анализ критериев прокладки высоковольтных кабельных линий по существующим трассам

Студент Эл-08м-18 Носов К. Н.
группа подпись фамилия и инициалы

Научный руководитель к.т.н доцент Титова Г. Р.
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

«Работа допущена к защите»

Зав. кафедрой к.т.н доцент Цырук С. А.
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

Дата _____

Москва, 2020



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт _____ **ИЭТЭ**
Кафедра _____ **ЭППЭ**

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
(магистерскую диссертацию)

Направление _____ **13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**
(код и наименование)

Направленность (профиль) _____ **Техническое и информационное**

обеспечение построения и функционирования источников питания, сетей и объектов электрического хозяйства потребителей

Форма обучения _____ **очная**
(очная/очно-заочная/заочная)

Тема: _____ **Анализ критериев прокладки высоковольтных кабельных**
_____ **линий по существующим трассам**

Студент _____ **Эл-08м-18** _____ **Носов К. Н.**
_____ группа _____ подпись _____ фамилия и инициалы

Научный _____ **к.т.н** _____ **доцент** _____ **Титова Г. Р.**
руководитель _____
_____ уч. степень _____ должность _____ подпись _____ фамилия и инициалы

Консультант _____
_____ уч. степень _____ должность _____ подпись _____ фамилия и инициалы

Консультант _____
_____ уч. степень _____ должность _____ подпись _____ фамилия и инициалы

Зав. кафедрой _____
_____ уч. степень _____ звание _____ подпись _____ фамилия и инициалы

Место выполнения работы _____ **ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»**

1.Обоснование выбора темы выпускной квалификационной работы

В настоящее время в городах с населением выше миллиона человек существует проблема высокой загруженности городского фонда объектами инфраструктуры. Увеличивается потребление электрической энергии такими городами, появляются новые, более жесткие требования к системе электроснабжения. Так же энергосистема таких городов и страны в целом характеризуется большим процентом износа линий электропередачи. Для повышения надежности электроснабжения потребителей требуется проводить реконструкцию питающих линий электропередачи, а так же улучшать кабельные линии для соответствия требованиям экологии, экономичности, надежности и так далее. Существует немало способов для проведения реконструкции с возможностью не прерывать работу объектов инфраструктуры. Это используется с целью минимизации затрат и увеличения темпов строительства. В связи с этим хотелось бы рассмотреть кабельные изделия, которые подходят для данных целей.

Научный руководитель Титова Г. Р.

дата

Студент Носов К. Н.

дата

2.Консультации по разделу

Подпись консультанта

дата

3.Консультации по разделу

Подпись консультанта

дата

4. План выполнения выпускной квалификационной работы

№ п\п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость, %
I.	Теоретическая часть	1.02.2020	30
II.	Экспериментальная часть	1.05.2020	45
III.	Оформление диссертации	1.06.2020	25

5. Рекомендуемая литература

1. Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: от 19 июня 2003 года №229: (Принят министерством энергетики Российской Федерации): (с изменениями от 13 февраля 2019 года) // Приказ министерства энергетики Российской Федерации. — 245 с.

2. Об утверждении энергетической стратегии России на период до 2020 года: от 28 августа 2003 года №1236-р: (Принят Правительством Российской Федерации): (с изменениями от 15 июня 2009 года) // Распоряжении Правительства Российской Федерации. — 125 с.

3. О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2016-2021 годы. Распоряжение №224 мэра Москвы от 5 апреля 2017 г., 2017. — 114 с.

4. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. — 2-е изд. — М.: Интермет Инжиниринг, 2006. — 672 с.

5. Макиенко Г. П., Попов Л. В. Кабельные маслонаполненные линии 110-500 кВ высокого давления / Г. П. Макиенко, Л. В. Попов. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 104 с.

Примечания:

1. Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3, 4, 5).
2. Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

АННОТАЦИЯ

Тема данной диссертации «Анализ критериев прокладки высоковольтных кабельных линий по существующим трассам».

В работе проанализировано существующее состояние высоковольтных сетей 110-500 кВ Московского региона. Рассмотрены требования к системам электроснабжения. Рассмотрены типы линий и объяснена необходимость реконструкции маслонаполненных линий высокого давления. Рассчитаны режимы работы существующей линии и показана возможность применения нового кабеля без уменьшения пропускной способности. Предложен вариант и преимущества замены устаревшего типа кабеля на новый.

Диссертация состоит из 91 страниц и содержит 10 таблиц и 17 рисунков.

ABSTRACT

The topic of this dissertation is "Analysis of criteria for laying high-voltage cable lines along existing routes".

The paper analyzes the current state of high-voltage networks of 110-500 kV in the Moscow region. Requirements for power supply systems are considered. The types of lines are considered and the need for reconstruction of oil-filled high-pressure lines is explained. The operating modes of the existing line are calculated and the possibility of using a new cable without reducing the throughput is shown. The variant and advantages of replacing an outdated cable type with a new one are suggested.

The dissertation consists of 91 pages and contains 10 tables and 17 figures.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА МОСКВЫ	10
1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ГОРОДА МОСКВЫ.....	10
1.1.1 Определение иерархии в структурной системе электроснабжения города Москвы	10
1.1.2 Динамические критерии развития электропотребления города Москвы	11
1.2 АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА МОСКВЫ	12
1.2.1 Анализ сетей напряжением 500 кВ.....	12
1.2.2 Анализ сетей напряжением 220 кВ.....	13
1.2.3 Анализ сетей напряжением 110 кВ.....	19
1.2.4 Определение критериев состояния СЭС города и требования к надежности СЭС	29
1.3 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗВИТИЯ СЭС ГОРОДА МОСКВЫ НА ПЕРСПЕКТИВУ С УЧЕТОМ РЕИНОВАЦИИ.....	33
1.3.1 Многокритериальные задачи по улучшению показателей СЭС города Москвы	33
1.3.2 Определение требований для использования «Ситикабеля».....	35
2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 110 кВ.....	39
2.1 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СЛОЖНОЗАМКНУТЫХ СЕТЯХ.....	39
2.2 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RastrWin	46
2.3 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ RastrWin	48
3. АНАЛИЗ РЫНКА КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	52
3.1 ПАРАМЕТРЫ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ.....	52
3.1.1 Развитие кабельной индустрии	52
3.1.2 Анализ структуры развития кабельной индустрии в России.....	53
3.2 МАСЛОНАПОЛЕННЫЕ КАБЕЛИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	56
3.2.1 Область применения	56
3.2.2 Конструкция кабеля и его характеристики.....	57
3.2.3 Прокладка кабеля	60
3.2.4 Сдача и эксплуатация кабельной линии высокого давления.....	63
3.3 КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ТИПА CityCable («Ситикабель»).....	66

3.3.1 Область применения	66
3.3.2 Конструкция и характеристики CityCable	67
3.3.3 Монтаж CityCable	70
3.3.4 Приемо-сдаточные испытания и эксплуатация CityCables	74
4. АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	87

ВВЕДЕНИЕ

Состояние Российской энергетики в настоящее время не является идеальным. Все это связано с тем, что многие линии электропередачи были построены в середине прошлого века. Как не трудно догадаться, они выработали свой ресурс и в данный момент являются слабым звеном в цепочке передачи электрической энергии от генерирующих станций к конечному потребителю. Перерывы электроснабжения порой достигают до 70-100 часов в год, что является недопустимым. В связи с выработкой ресурса линиями страдает и качество электрической энергии, что негативно сказывается на потребителях. Они получают меньше электрической энергии, а так же страдает качество выпускаемой продукции. Так же возникают излишние потери электрической энергии, которая теряется в элементах сети при передаче.

Частным случаем устаревшего оборудования являются кабельные линии, выполненные маслонаполненными кабелями высокого давления. Данный тип кабеля применялся повсеместно в прошлом веке на напряжение 110-500 кВ, так как в то время не существовало более совершенного типа изоляции, чем бумага, пропитанная маслом. Конечно, МНК не является идеальным изделием, особенно в настоящее время, когда требования к экологии ужесточены. Это связано с тем, что трубопроводы, в которых проложены кабели, заполняются маслом. При возникновении течи масло попадает в окружающую среду, разрушая при этом экологическую систему в данной местности. Так же обслуживание кабелей такого типа и маслоподпитывающей аппаратуры довольно затратное мероприятие.

Еще одной проблемой является высокая загруженность инфраструктуры городов-миллионников. Потребление таких городов растет из года в год. В связи с этим существующие кабельные линии не справляются с возросшей нагрузкой, и требуется строительство новых линий либо реконструкция старых. Из-за высокой плотности городской застройки, а так же прохождения существующих линий по объектам культурного наследия, не всегда удается создать новую трассу кабельной линии.

Одним из главных критериев при реконструкции линий является экономическая составляющая. Безусловно, данный аспект важен, но помимо этого существует еще множество критериев, которыми не стоит пренебрегать. Это связано с тем, что энергетические системы являются динамическими единицами и рассматривать только экономическую составляющую неправильно. Таким образом, при реконструкции сетей требуется руководствоваться различными параметрами, что означает, что данные задачи являются многокритериальными. Они вытекают из требований к системам электроснабжения.

Целью диссертации является определение методики прокладки высоковольтных кабельных линий по существующим трассам с применением новейших технологий.

Для реализации поставленной цели требуется решить ряд задач:

1. провести анализ существующих высоковольтных сетей в городе Москве и оценить их состояние;

2. провести расчет электрических режимов для того, чтобы показать возможность использования нового типа кабеля;

3. показать возможности нового и старого кабеля;

4. провести сравнение существующих типов кабелей и определить критерии для их прокладки.

Предметом исследования являются высоковольтные сети города Москвы, а в частности масляные кабельные линии высокого давления.

Информационной базой являются справочная и методическая литература, научные статьи, данные заводов-изготовителей, информация интернет ресурсов и другие источники, относящиеся к исследуемой теме.

Научная новизна работы состоит в разработке многокритериальной методики прокладки высоковольтных кабельных линий по существующим трассам. Разработанная методика поможет повысить надежность электроснабжения потребителей и улучшить качество электрической энергии.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанную методику можно будет применять при разработке проектов по реконструкции маслонеполненных линий высокого давления с использованием наилучших доступных технологий.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА МОСКВЫ

1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ГОРОДА МОСКВЫ

1.1.1 Определение иерархии в структурной системе электроснабжения города Москвы

На территории Российской Федерации располагается 1117 городов (по данным 2019 г.) 15 из которых являются городами миллионерами. Самые крупные из них это Москва (население 12,7 млн. человек, по данным 2020 г.) и Санкт-Петербург (население 5,4 млн. человек, по данным 2020 г.). В данных городах высокая плотность застройки жилыми и общественными зданиями, из-за чего передача электрической энергии при помощи воздушных линий — непопустительная роскошь, так как стоимость земли в черте города достаточно высокая.

В связи с тем, что для воздушных высоковольтных линий электропередач (ВЛЭП) требуется достаточно большая охранная зона (для 110 кВ — 20 м; для 220 кВ — 25 м; для 330-500 кВ — 30 м), было принято решение о переводе воздушных линий в кабельные линии (КЛ). Общая стоимость земли в городе Москва, находящейся под охранной зоной ВЛЭП, по оценкам различных экспертов, доходила в 2007 г. до 10 млрд. долларов. Благодаря этому уже в 2008 году было издано Распоряжение Правительства Москвы № 782-РП «О комплексном освоении в целях жилищного строительства территории в рамках реализации проекта переустройства существующих воздушных высоковольтных линий электропередачи на территории Северо-Восточного административного округа города Москвы и о подготовке проведения аукциона на право заключения договоров аренды земельных участков». В данном распоряжении говорится о необходимости переноса ВЛЭП под землю и сдачи полученных территорий в аренду, для улучшения экологического и эстетического облика города. На территории Северо-Восточного административного округа (СВАО) существовали воздушные линии напряжением 110, 220 и 500 кВ. В настоящее время протяженность воздушных линий по территории города Москвы значительно снижена.

Развитие энергетической отрасли в городе Москве продолжил и Сергей Семенович Собянин. Так в апреле 2017 г. было принято распоряжение № 224-РМ «О Схеме и программе перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2016-2021

годы». В данной схеме развития учтены перспективы развития города Москвы в соответствии с Генеральным планом развития города до 2025 г.. Главной задачей данного документа является удовлетворение растущего спроса на энергетические ресурсы, в связи с вводом в эксплуатацию различных объектов, при помощи введения новых и поддержанием работоспособности существующих объектов энергетической отрасли, которые имеются в городе Москва. Установленная мощность электрических станций энергосистемы города Москвы по данным на 31 декабря 2015 г. составляла 11236 МВт. Основными компаниями, которые занимаются генерацией на территории города, являются ПАО «Мосэнерго», ПАО «МОЭК», КП МЭД, ОАО «Мосгаз» и другие компании в число которых входит и ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ». Крупнейшими компаниями, которые занимаются передачей электрической энергии, являются ПАО «МОЭСК» (в настоящее время работает под брендом Россети Московский регион), ПАО «ФСК ЕЭС», АО «ОЭК». Так же существует ряд сетевых организаций, регулируемых территориально, занимающихся передачей ЭЭ. В их число входят АО «Аэропорт Внуково», АО «Газпромнефть — Московский НПЗ», ГУП «Московский метрополитен» и другие. Энергосбытовыми организациями являются четыре гарантирующих поставщика ПАО «Мосэнергосбыт», ООО «Энергосбытхолдинг», АО «Оборонэнергосбыт», МУП «Троицкая электросеть», а так же ряд менее крупных компаний.

1.1.2 Динамические критерии развития электропотребления города Москвы

В период с 2011 по 2015 гг. возросло потребление электрической энергии городом Москвой и Московской областью на 3759 млн. кВт*ч и достигло к 2015 г. 101982 млн. кВт*ч, что в процентном отношении от всей страны равняется 10% . Данный показатель характеризует энергосистему Московского региона как крупнейшую энергетическую систему страны, обогнав по энергопотреблению Тюменскую (83 млн. кВт*ч), Иркутскую (52,5 млн. кВт*ч), Ленинградскую (43,5 млн. кВт*ч). По состоянию на 2019 год Москва и Московская область потребила около 108 млн. кВт*ч, что говорит о достаточно высоких темпах развития города и области.

Данные по энергопотреблению Московского региона за период с 2015 по 2019 гг. представлены на рисунке 1.1. Как видно из графика, энергопотребление региона растет с каждым годом, исключение составляет разница между 2018 и 2019 гг. Это может быть связано с тем, что в 2018 г. в Москве проводился чемпионат мира по футболу и требовались дополнительные мощности для спортивно-зрелищных мероприятий, которые

проводились по всей столице. В структуре энергопотребления по видам экономической деятельности выделяются: бытовой сектор (около 13%), обрабатывающие производства (около 9%), сфера услуг (около 16%), потери в элементах электрической сети (около 5% и снижается с каждым годом) и другие. Энергосистема Московской агломерации является самой мощной в объединенной энергетической системе Центра (ОЭС Центра) и составляет около 46% (по данным 2015 г.) по мощности от общего объема потребления региона в целом.

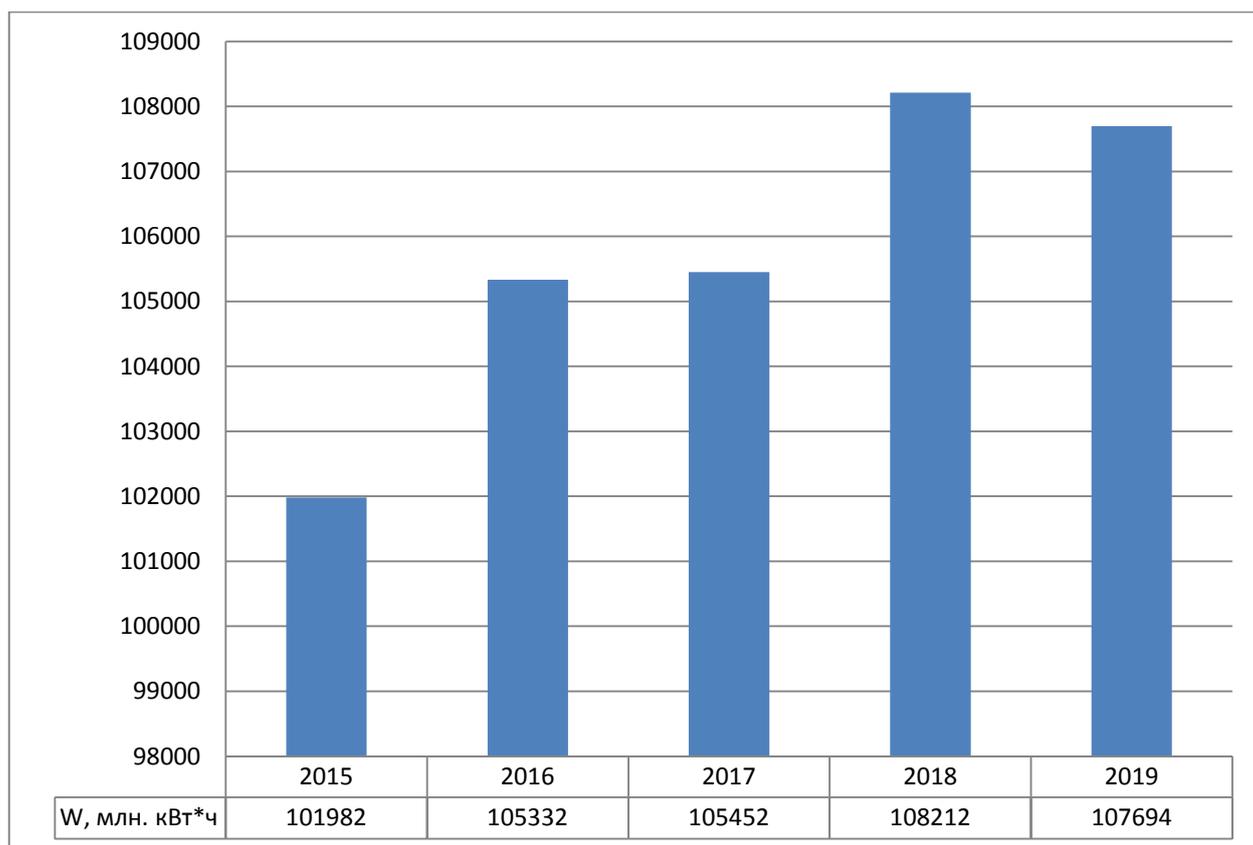


Рис. 1.1 — Динамика потребления электрической энергии городом Москва и Московской областью в период с 2015 по 2019 гг.

1.2 АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА МОСКВЫ

1.2.1 Анализ сетей напряжением 500 кВ

Для обеспечения города таким большим объемом электрической энергии требуется большая протяженность линий электропередач различного напряжения. Для надежного электроснабжения потребителей было введено в строй московское энергетическое кольцо, которое состоит из воздушных высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП)

напряжением 500 кВ и группой мощных подстанций находящихся в черте города и за его пределами. Данный класс напряжения является системообразующим. Перечень линий входящих в Московское энергетическое кольцо представлен в таблице 1.1. По данным таблицы видно, что часть линий, выполненная воздушным способом, превысила нормативный срок эксплуатации и нуждается в реконструкции (эксплуатируются более 45 лет). Некоторые участки линий выполнены кабелем. Данные кабельные линии были введены в эксплуатацию с начала 2000 г., для их постройки использовались кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Прокладка в земле применялась из-за того, что линии 500 кВ проходили по территории строящихся и проектируемых жилых районов, и место для воздушной линии попросту отсутствовало (для напряжения 500 кВ требуется 30 м в каждую сторону от края траверсы). При несоблюдении данных нормативов люди находящиеся вблизи ВЛЭП могут попасть под действие электромагнитного поля, что негативно сказывается на здоровье человека. На подстанциях, находящихся на территории города Москвы, таких как Бескудниково, Очаково, Чагино, Каскадная, была проведена реконструкция в период с 2008 по 2015 гг. Была проведена замена трансформаторов и автотрансформаторов, отработавших свой срок службы, исключение составила ПС Чагино (срок службы трансформаторов составляет более 30 лет). Суммарная длина линий 500 кВ по территории города составляет 106,44 км. В большинстве своем (около 99%), линии находятся на балансе ПАО «ФСК ЕЭС», оставшаяся часть числится на балансе ПАО «МОЭСК».

1.2.2 Анализ сетей напряжением 220 кВ

Вторым системообразующим классом напряжения для энергетической системы города Москвы является 220 кВ. На территории города располагаются 54 подстанции с высшим напряжением 220 кВ. Их связывают кабельно-воздушные линии общей длиной 1280 км (по состоянию на 2015 г.), из них 598 км — кабельные линии, 682 км — воздушные. Перечень воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ представлен в таблице 1.2. Как видно из представленных данных, все линии сооружены при помощи сталеалюминевых проводов. Все ВЛЭП были построены еще в Советском Союзе и давно превысили нормативный срок эксплуатации сталеалюминевых проводов, который составляет 45 лет согласно ГОСТ 839-80. Для наглядности, данные по превышению сроку эксплуатации представлены на рисунке 1.4, он включает в себя так же воздушную часть кабельно-воздушных линий.

Таблица 1.1 — Перечень линий электропередач напряжением 500 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

ПАО «ФСК ЕЭС»	Наименование ЛЭП	Марка провода или кабеля	Длина ² , км	Год постройки или реконструкции	Время эксплуатации, лет
	КВЛ Белый Раст — Бескудниково	3хАСО-500 + 3хАС 600/72, 2XS(FL)2Y 1х2500	45,6	1966/1980/2008	54/40/12
	КВЛ Ногинск — Бескудниково	3хАСО-332 + 3хАС 400/51, 2XS(FL)2Y 1х2500	77,9	1956/2000/2007	64/20/13
	КВЛ Трубино — Бескудниково	3хАСО-480/60 + 3хАС 500/64, 2XS(FL)2Y 1х2500	36,2	1956/1980/2008	64/40/12
	ВЛ Ногинск — Каскадная	3хАСО 332	40,3	1958/2013	62/7
	ВЛ Каскадная — Чагино	3хАСО 332 + 3хАС 330/43	12	1958/1970/2005/2013	62/50/15/7
	ВЛ Михайловская — Чагино с отпайкой на ПС Калужская	3хАС 500/64 + 3хБС 300/167	184	1959	61
	ВЛ Пахра — Чагино	3хАСО 500	36,8	1963/1982	57/38
	КВЛ Западная — Очаково	3хАСО 500 + 3хАС 500/64, 2XS(FL)2Y 1х2500	33,2	1966/2007/2008/2012/2013	54/13/12/8/7
	КВЛ ТЭЦ-26 — Очаково	3хАС 500/64 + 3хАС 330/43 + 3хАС 300/66 + 3хАС 500/64, 2XS(FL)2Y 1х2500	38,2	1961/1987/1980/2000/2008	59/33/40/20/12
ВЛ Пахра — ТЭЦ-26	3хАС 500/64	16,6	1961/1977	59/43	
1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.2 — Указана полная длина линий.					

При невозможности возведения воздушной линии применяется кабельная прокладка, так в структуре энергетического хозяйства Москвы появились кабельно-воздушные линии (КВЛ). Перечень кабельно-воздушных линий представлен в таблице 1.3. Из данных, которые представлены в таблице, видно, что часть КВЛ, выполненная при помощи воздушной линии электропередачи, сооружена сталеалюминевыми проводами, как и воздушные линии 220 кВ, так как они были построены приблизительно в одно время. В связи с этим становится ясно, что срок эксплуатации так же превышает нормативный срок службы сталеалюминевых проводов, как и при воздушном исполнении линий. Часть КВЛ 220 кВ, построенная в кабельном исполнении, в большинстве своем сооружена при помощи современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (около 57% линий выполненных кабельным способом). Данные кабели стали применять при реконструкции КВЛ после 2000 года, так как к этому времени был накоплен обширный зарубежный и отечественный опыт доказывающий преимущество СПЭ изоляции над бумажно-масляной изоляцией (БМИ). Однако до сих пор маслонаполненные кабели высокого давления эксплуатируются в электрических сетях города Москвы на напряжении 110-220 кВ.

В структуре КВЛ 220 кВ маслонаполненных кабелей (МНК) около 43 % от общего числа той части КВЛ, которая сооружена в кабельном исполнении. Согласно ГОСТ 16441-78 срок эксплуатации маслонаполненных кабелей высокого давления составляет 35 лет. Для данных линий срок эксплуатации еще не подошел к концу, но современные требования к экологии указывают на то, что использование данного типа кабелей является нецелесообразным, а так же электрические характеристики кабелей со СПЭ изоляцией выше, чем у БМИ. Для наглядности данные проиллюстрированы рисунком 1.3.

Большая часть подстанций, ВЛ и КВЛ 220 кВ числится на балансе ПАО «МОЭСК». Из 54 подстанций 220 кВ находящихся на территории города Москвы были реконструированы около 85%. В период до 2010 г. была произведена замена трансформаторов и автотрансформаторов, а так же коммутационно-защитной аппаратуры. В настоящее время так же ведутся работы по реконструкции и расширению подстанций, с оборудованием, превысившим срок эксплуатации. Например, проводится реконструкция и расширение ПС 220 кВ «Лесная» для повышения надежности энергоснабжения потребителей Юго-Западного административного округа (ЮЗАО) и подключения дополнительных потребителей Троицкого и Новомосковского административного округа (ТиНАО) города Москвы.

Таблица 1.2 — Перечень воздушных линий электропередач напряжением 220 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

	Наименование	Марка провода	Длина линии ² , км	Год постройки/реконструкции	Срок эксплуатации
ПАО «МОСК»	Жулебино — Восточная	АСО-500, АС-450, АСУ-400, АС-400	7,5	1946	74
	Пахра — Борисово	Маллард, АСУ-400, АС450, АС-400	1,1	1937	83
	ТЭЦ-23 — Свиблово 1 цепь	АС-400	9	1936	84
	ТЭЦ-23 — Свиблово 2 цепь	АС-400	9	1936	84
	Южная — Сабурово	АС-400	6,5	1938	82
	Встреча — Лесная	АС-400	26,9	1954	66
	Кедрово — Встреча	АС-400	12,1	1954	66
	Кедрово — Лесная	АС-400	38,5	1954	66
	ПАО «ФСК ЕЭС»	Образцово — Лесная	АСУ-300	20,2	1936

1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.
2 — Указана полная длина линий.

Таблица 1.3 — Перечень кабельно-воздушных линий электропередач напряжением 220 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

ПАО «МОЭСК»	Наименование	Марка провода или кабеля	Длина линии ² , км	Год постройки/реконструкции	Срок эксплуатации
	Борисово — Баскаково	АСУ-400, АСО-400, АС-400	13,2	1937	81
		МВДТк 1x1200		1987	33
	Марфино — Свиблово 1 цепь	2хАС-240	4	1938	82
		2XS(FL)2Y 1x1200		2008	12
	Марфино — Свиблово 2 цепь	2хАС-240	6,5	1939	81
		2XS(FL)2Y 1x1200 EXCW.FO 1x1200		2009	11
	Пахра — Чагино	АС-400, АСУ-400	6,5	1936	84
		XPLE 1x2000		2009	11
	Перерва — Баскаково	АСУ-400, АСО-400, АС-400	14,4	1938	82
МВДТк 1x1200 НХСНВМК-2F 1x1200		5,3	2000	20	
Руднево — ТЭЦ-23	АСУ-400, АСО-500, АС-600	9,4	1972	48	
	МВДТк 1x1200	1,6	1988	32	
Сабурово — Перерва	АСУ-400, АСО-400, АС-400	0,6	1938	82	
	НХСНВМК-2F 1x1600	2	2000	20	

1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.

2 — Указана полная длина линий.

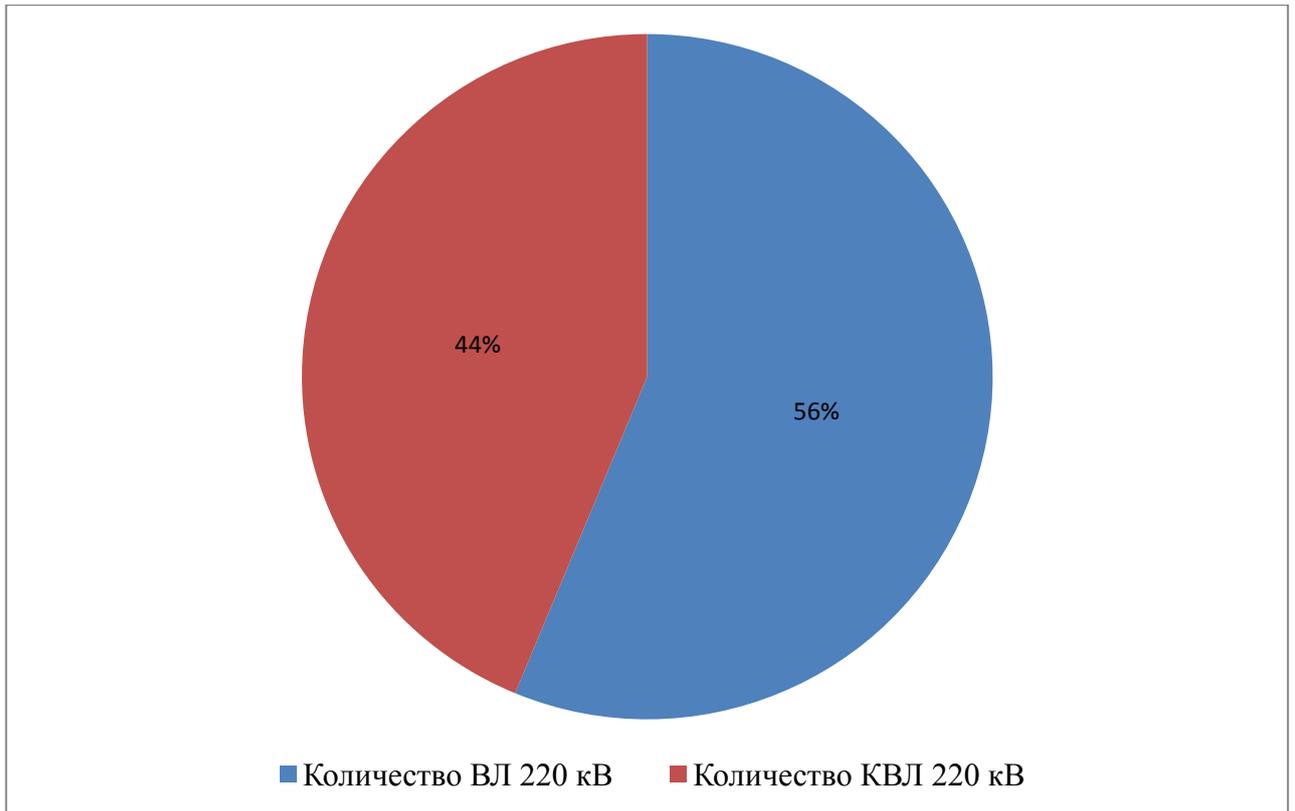


Рисунок 1.2 — Процентное отношение ВЛ и КВЛ 220 кВ в структуре системы электроснабжения города Москвы

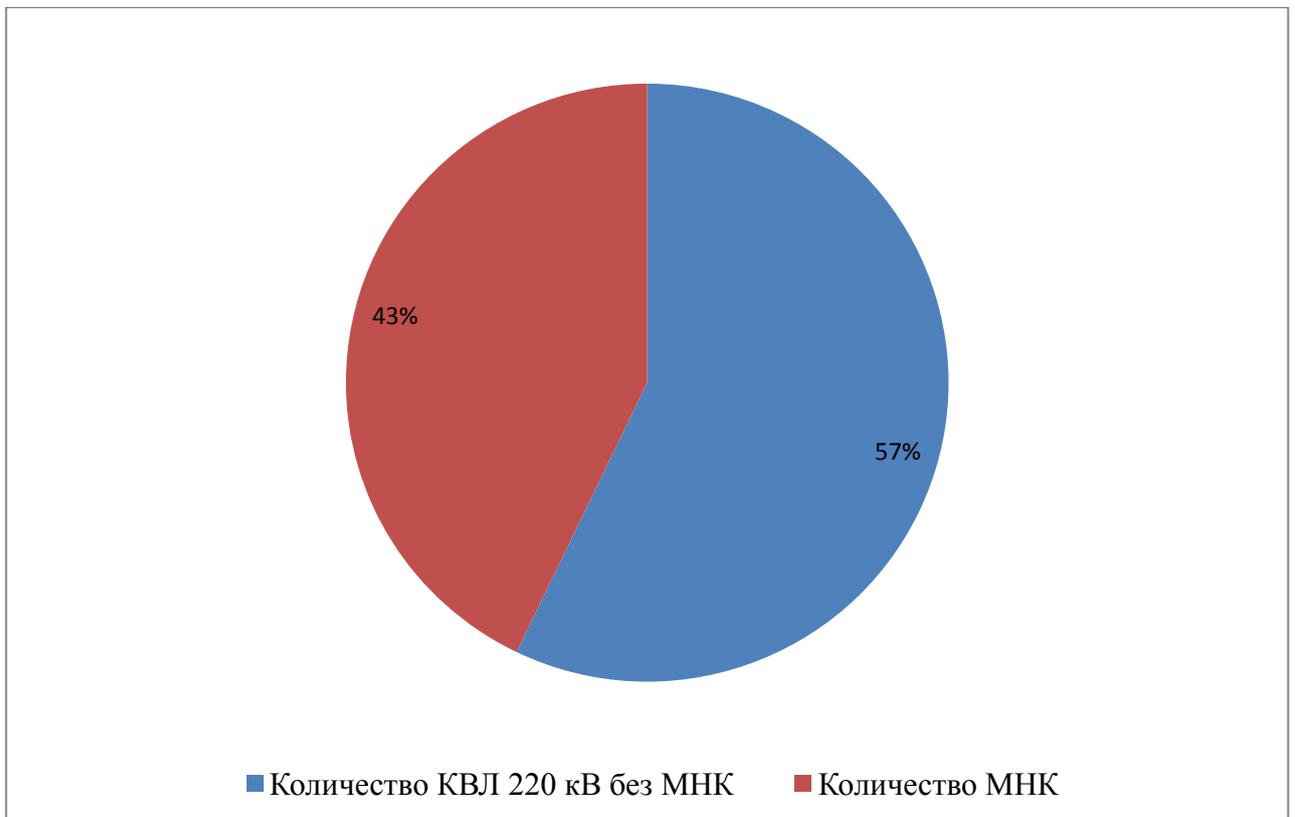


Рисунок 1.3 — Процентное отношение маслонаполненных кабелей (МНК) в структуре КВЛ 220 кВ

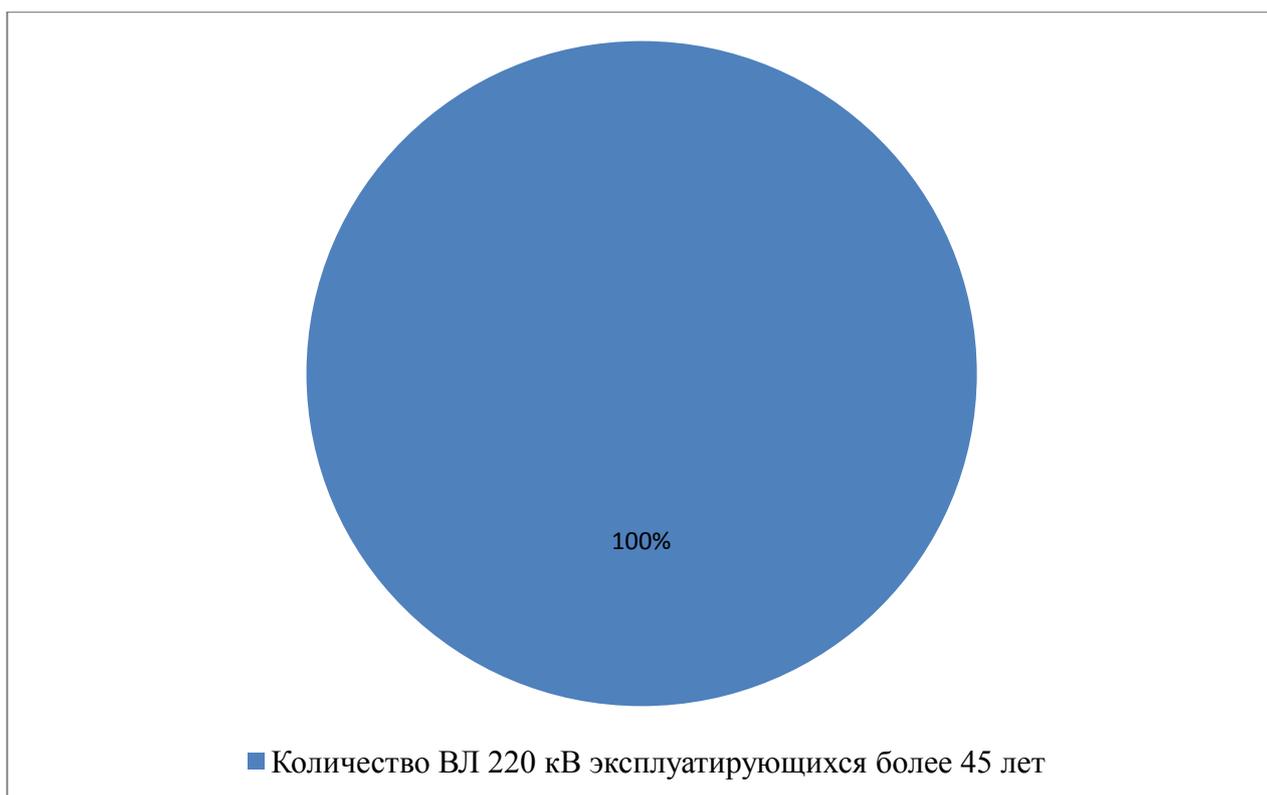


Рисунок 1.4 — Процент ВЛ 220 кВ эксплуатирующихся более 45 лет

Часть линий удастся реконструировать с помощью городской программы развития инфраструктуры и жилого фонда, так как существующие кабельные линии приходится переносить, а воздушные линии переводятся в кабельные линии. Вместе с переносом и переводом ВЛ в КЛ устанавливается различное новое оборудование для контроля за кабельной линией. В настоящее время устанавливаются системы непрерывного мониторинга температуры кабеля, а так же системы контроля частичных разрядов (ЧР), для своевременного выявления и устранения дефектов в кабелях, так как выявленный дефект проще предупредить, чем проводить восстановление.

1.2.3 Анализ сетей напряжением 110 кВ

В энергетической системе города Москвы класс напряжения 110 кВ не является системообразующим, его приравнивали к распределительному классу. В связи с этим при реконструкции сетей 110 кВ стараются повышать их класс напряжения до 220 кВ в тех местах, где имеется техническая и экономическая возможность. Подстанций, с высшим напряжением 110 кВ на территории города Москвы существует 110 шт. (по данным 2015 г.). Их связывают воздушные, кабельно-воздушные и кабельные линии 110 кВ общей

протяженностью 1648,6 км (по данным 2015 г.), из них 681,4 км — кабельные линии, 967,2 км — воздушные.

Перечень воздушных линий электропередачи 110 кВ расположенных на территории города Москвы представлены в таблице 1.4. Из представленных данных видно, что подавляющее большинство линий выполнено с применением сталеалюминевых проводов. Все линии превысили нормативный срок эксплуатации (для сталеалюминевых проводов срок эксплуатации 45 лет согласно ГОСТ 839-80) и нуждаются в реконструкции, так как большинство линий были возведены в 30-40-х гг. прошлого века, соответственно их срок эксплуатации превышен в 2 раза.

В структуре напряжения 110 кВ присутствуют, так же как и на напряжении 220 кВ, кабельно-воздушные линии. Перечень КВЛ представлен в таблице 1.5. По данным таблицы так же отчетливо видно, что часть, выполненная воздушным исполнением, в подавляющем большинстве сооружена при помощи сталеалюминевых проводов, которые были введены в эксплуатацию более 45 лет назад, так как возводились приблизительно в те же годы что и воздушные линии. Часть, выполненная кабельным способом, является более современной, так как выполнена кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена (около 60 % линий). Так же присутствуют маслонаполненные кабели высокого давления, которые были проложены во второй половине восьмидесятых годов и не достигли предельного срока эксплуатации (согласно ГОСТ 16441-78 срок службы маслонаполненных кабелей высокого давления составляет 35 лет). Но в связи с ужесточением экологических требований, а так же сложностей, возникающих при эксплуатации, использование данного типа кабелей является нецелесообразным. В структуре КВЛ 110 кВ присутствует около 40 % линий, часть которых выполнена маслонаполненными кабелями высокого давления. Для наглядного представления данные проиллюстрированы рисунком 1.8.

Так же помимо ВЛ и КВЛ в структуре ЛЭП 110 кВ присутствуют чисто кабельные линии. Перечень кабельных линий 110 кВ представлен в таблице 1.6. Как видно из представленных данных большая часть линий была построена в конце пятидесятых годов прошлого века. Для их возведения повсеместно применялся маслонаполненный кабель высокого давления, так как на то время не существовало более совершенного типа кабелей. По данным таблицы каждая кабельная линия имеет в своем составе МНК высокого давления либо полностью состоит из него. Срок эксплуатации большинства маслонаполненных кабелей превысил нормативный. В связи с этим, а так же ужесточенными экологическими требованиями требуется заменить данные кабели на

более совершенные типы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Нормативный срок службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена составляет 30 лет при соблюдении условий транспортировки, монтажа, хранения и эксплуатации (по данным завода изготовителя кабельной продукции ООО «Камкабель»). На рисунке 1.6 наглядно представлено процентное отношение маслонаполненных кабелей высокого давления в общей структуре КВЛ и КЛ 110 кВ. Около 64% линий все еще эксплуатируются с применением МНК высокого давления. Часть линий удастся заменить в связи со строящимися объектами, которые попадают на кабельную трассу. При этом требуется вынос электрического кабеля из зоны проведения работ для строительства объектов инфраструктуры или жилого фонда. Таким способом была реконструирована часть линии Чоботы — Полет, которая попала в зону расширения Боровского шоссе. При невозможности изменить трассу при замене МНК высокого давления возможно применение специального типа кабеля «Ситикабель» (CityCables), предназначенного для замены МНК в трубах. Данный кабель был разработан немецкой фирмой NKT Cables и успешно применялся в ряде проектов, как в нашей стране, так и за рубежом.

Общая длина воздушных, кабельно-воздушных и кабельных линий 110 кВ по территории города Москвы составляет 1648,6 км (по данным на 2016 г.). Процентное отношение ЛЭП 110 кВ представлено на рисунке 1.5. Из него видно, что подавляющее большинство линий выполнено воздушным способом (77% ВЛ и КВЛ совместно, из них 35% КВЛ и 42% ВЛ). Из данной диаграммы следует, что еще очень большое количество воздушных линий электропередачи в городе Москва требуется перевести в разряд кабельных, для улучшения эстетического облика города, а так же улучшения экологических и других норм.

Большинство электрооборудования числятся на балансе ПАО «МОЭСК» так же как и электрооборудование на 220 кВ. Из 110 подстанций с высшим напряжением 110 кВ, находящихся в черте города, около 45% требуют замены трансформаторов, так как не реконструировались с 70-х годов прошлого века. Естественно, что постепенная реконструкция всех энергетических объектов ведется для повышения надежного электроснабжения.

Таблица 1.4 — Перечень воздушных линий электропередач напряжением 110 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

ПАО «МОЭСК»	Наименование	Марка провода	Длина линии ² , км	Год постройки/реконструкции	Срок эксплуатации
	Борисово — Ленинская 1 цепь	АС-150	8,3	1931	89
	Борисово — Ленинская 2 цепь	АС-150	8,3	1931	89
	Измайловская — Восточная 1 цепь	М-95, АС-150	6,2	1926	94
	Измайловская — Восточная 2 цепь	М-95, АС-150	6,2	1926	94
	Минеральная — Некрасовка цепь	АС-150	0,9	1925	95
	Пахра — Борисово	АС-150	1	1934	86
	Прогресс — Некрасовка	АС-150	0,9	1925	95
	Ростокино — Бутырки 1 цепь	АС-150	3,4	1929	91
	Ростокино — Бутырки 2 цепь	АС-150	3,4	1929	91
	Сабурово — Гоголево	АС-150	6,6	1922	98
	Свиблово — Ростокино 1 цепь	АС-150	7,2	1928	92
	Свиблово — Ростокино 2 цепь	АС-150	7,2	1928	92
	Свиблово — Сокольники 1 цепь	АС-150	5,4	1928	92
	Свиблово — Сокольники 2 цепь	АС-150	5,4	1928	92
	Сокольники — Хвойная	АС-185, АС-240	8	1928	92
	Южная — Сабурово	АС-150	7,4	1930	90
	Ваулово — Лебедево	АС-150	45,5	1964	56
	Ваулово — Кресты	АС-150	25,8	1963	57
Леоново — Лесная	АС-150, АС-240	9	1966	54	
Летово — Теплый Стан 1 цепь	АС-240	6	1964	56	
Летово — Теплый Стан 2 цепь	АС-240	6	1964	56	

Продолжение таблицы 1.4

	Нарофоминск — Селятино 1 цепь	АС-150	21,9	1954	66
	Нарофоминск — Селятино 2 цепь	АС-150	21,9	1954	66
	Пахра — Сырово	АС-150	3	1964	56

1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.

2 — Указана полная длина линий.

Таблица 1.5 — Перечень кабельно-воздушных линий электропередач напряжением 110 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

ПАО «МОЭСК»	Наименование	Марка провода	Длина линии ² , км	Год постройки/реконструкции	Срок эксплуатации
	Автозаводская — Южная 1 цепь	АС-150, АС-240	2,6	1931	89
		АПвПу 1x350 ПвПу2г 1x630	2,6	1991	29
	Баскаково — Косино 1 цепь	АС-150	1,9	1938	82
		АПвПу 1x350	1	1988	32
	Баскаково — Косино 2 цепь	АС-150	1,9	1938	82
		АПвПу 1x350	1	1988	32
	Восточная — Некрасовка	М-95, АС-150	0,92	1946	74
		ПвПу2г 1x630		2005	15
Восточная — Черкизово 1 цепь	М-95, АС-150	6	1938	82	
	ПвПу2г 1x1000, 2XS(FL)2Y-LWL 1x1200	3,3	2011	9	
Восточная — Черкизово 1 цепь	АС-150	6	1938	82	
	ПвПу2г 1x1000, 2XS(FL)2Y-LWL 1x1200	3,3	2011	9	

Продолжение таблицы 1.5

ПАО «МОЭСК»	Измайлово — ТЭЦ-23 1 цепь	М-95, АС-150	3	1928	92
		МССК 1x270	2,8	1969	51
	Измайлово — ТЭЦ-23 2 цепь	М-95, АС-150	3	1928	92
		МССК 1x270	2,8	1969	51
	Косино — Выхино 1 цепь	АС-150, АС-185	6,5	1925	95
		МНСК 1x270, ПвПу2г 1x300	2,6	2004	16
	Косино — Выхино 2 цепь	АС-150, АС-185	6,5	1925	95
		МНСК 1x270, ПвПу2г 1x300	2,6	2004	16
	Кожухово — Южная	АС-150, АС-240	2,6	1931	89
		ПвПу2г 1x350	3,1	1991	31
	Неминовка — Барвиха 1 цепь	АС-150	0,3	1934	86
		2XS(FL)2Y 1x800		2012	8
	Неминовка — Барвиха 2 цепь	АС-150	0,3	1934	86
		2XS(FL)2Y 1x800		2012	8
	ТЭЦ-8 — Чагино	АС-150	8,7	1925	95
		МСАГШВу 1x625, МНСА 1x270, АПвПу 1x350	7,5	2010	10
	Угреша — Автозаводская	АС-150	1	1930	90
		АПвПу 1x500, ПвПу2г 1x630	2	2004	16
	Чагино — АЗЛК 1 цепь	М-95, АС-150	6,2	1927	93
		МНСК 1x625, АПвПу 1x350	6,2	1986	34
Чагино — АЗЛК 2 цепь	М-95, АС-150	6,2	1927	93	
	МНСК 1x625, АПвПу 1x350	6,2	1986	34	

Окончание таблицы 1.5

	Чагино — Новоспасская	АС-150	8,7	1925	95
		МНСК 1x625, АПвПу 1x350	5,3	1987	33
	Грач — Сырово	АС-400, ПвПу2г 1x630	2,1	1964	56
	Пахра — Грач	АС-400, ПвПу2г 1x630	1,2	1964	56
1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.					
2 — Указана полная длина линий.					

Таблица 1.6 — Перечень кабельных линий электропередач напряжением 110 кВ, находящихся на территории города Москвы¹

ПАО «МОСК»	Наименование	Марка провода	Длина линии ² , км	Год постройки/реконструкции	Срок эксплуатации
	Бутырки — Самарская 1 цепь	МНСК 1x270, ПвПу2г 1x300	5,3	1959/2005	61/15
	Бутырки — Самарская 2 цепь	МНСК 1x270, ПвПу2г 1x300	5,3	1959/2005	61/15
	ГЭС-1 — Автозаводская	МНСК 1x270, МССК 1x270, МСаШву 1x270, ПвПу2г 1x300	8	1952/1991/2000/2012	67/29/20/8
	ГЭС-1 — Кожухово	МНСА 1x270, ПвПу2г 1x300, ПвПу2г 1x630	7,5	1952/2000/2012	67/20/8
	Елоховская — Андроньевская 1 цепь	МНСК 1x270, МССК 1x270, МСаШву 1x270, ПвПу2г 1x300	6,9	1959/1981/2000/2003	61/39/20/17

Продолжение таблицы 1.6

ПАО «МОЭСК»	Елоховская — Андроньевская 2 цепь	МНСК 1x270, МССК 1x270, МСаШВу 1x270, ПвПу2г 1x300	6,9	1959/1981/2000/2003	61/39/20/17
	Карачарово — Андроньевская 1 цепь	МНСК 1x270, МНСА 1x270, ПвПу2г 1x300	4,7	1959/2002	61/18
	Карачарово — Андроньевская 1 цепь	МНСК 1x270, МНСА 1x270, ПвПу2г 1x300	4,7	1959/2002	61/18
	Прожектор — Измайлово 1 цепь	МСАВу 1x270, МНСА 1x270, ПвПу2г 1x1000	3,5	1965/2011	55/9
	Прожектор — Измайлово 2 цепь	МСАВу 1x270, МНСА 1x270, ПвПу2г 1x1000	3,5	1965/2011	55/9
	Самарская — Рижская 1 цепь	МНСК 1x270, МССК 1x270	1,4	1959/1988	61/32
	Самарская — Рижская 2 м	МНСК 1x270, МССК 1x270	1,4	1959/1988	61/32
	ТЭЦ-8 — Новоспаская	МССК 1x625, МСАГШВу 1x625, МСАА 1x270, МАШВу 1x270	2,2	1977	43

1 — Данные приведены по состоянию на 2016 г.

2 — Указана полная длина линий.

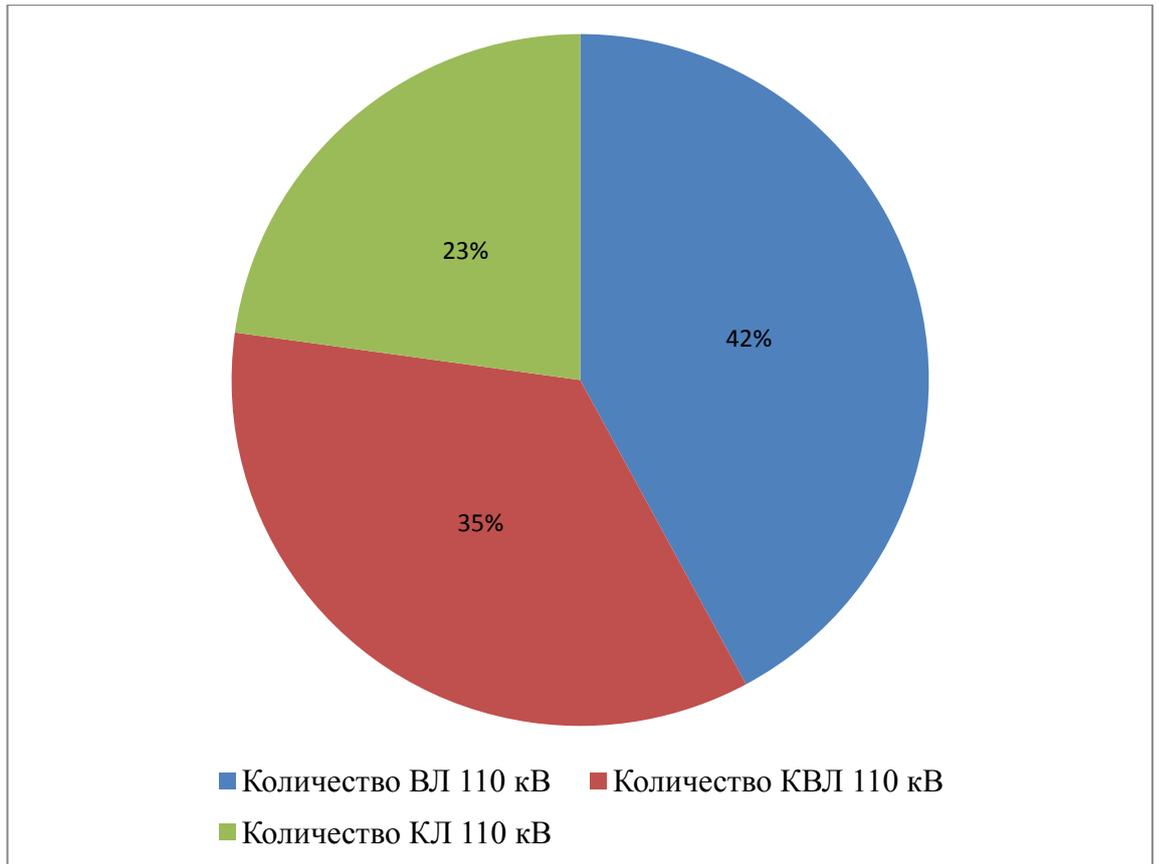


Рисунок 1.5 — Процентное отношение ВЛ, КВЛ и КЛ 110 кВ в структуре системы электроснабжения города Москвы

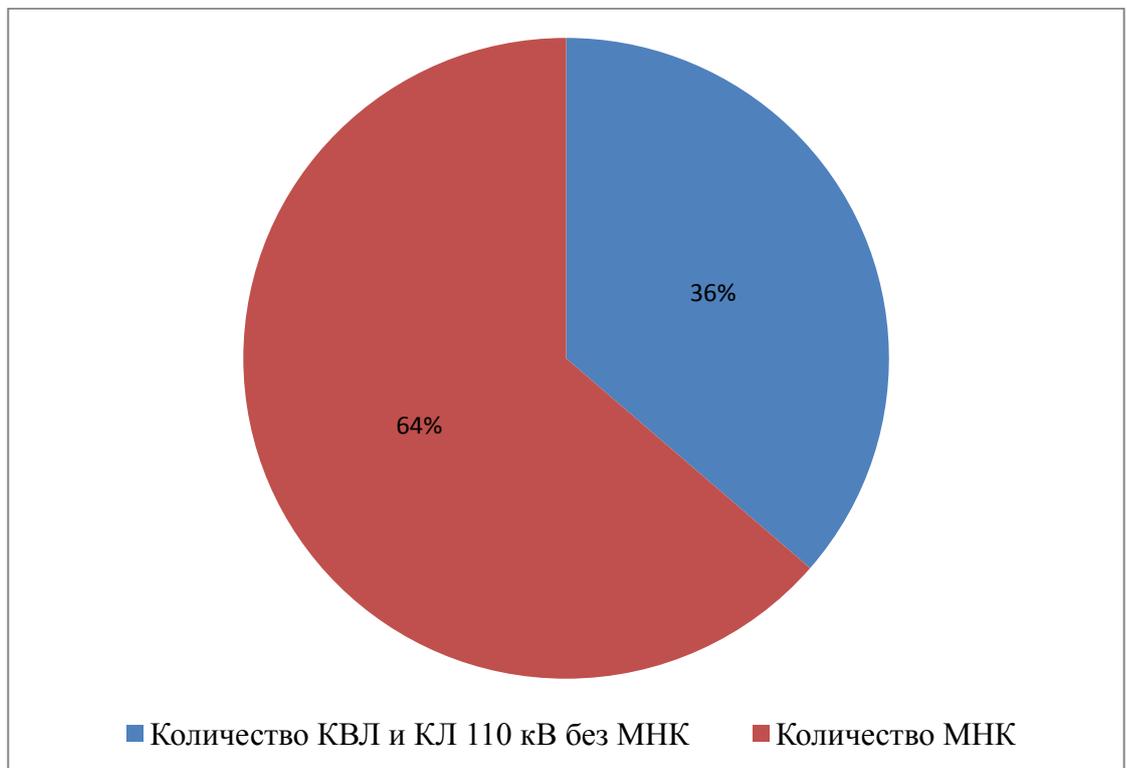


Рисунок 1.6 — Процентное отношение маслонаполненных кабелей (МНК) в структуре КЛ и КВЛ 110 кВ

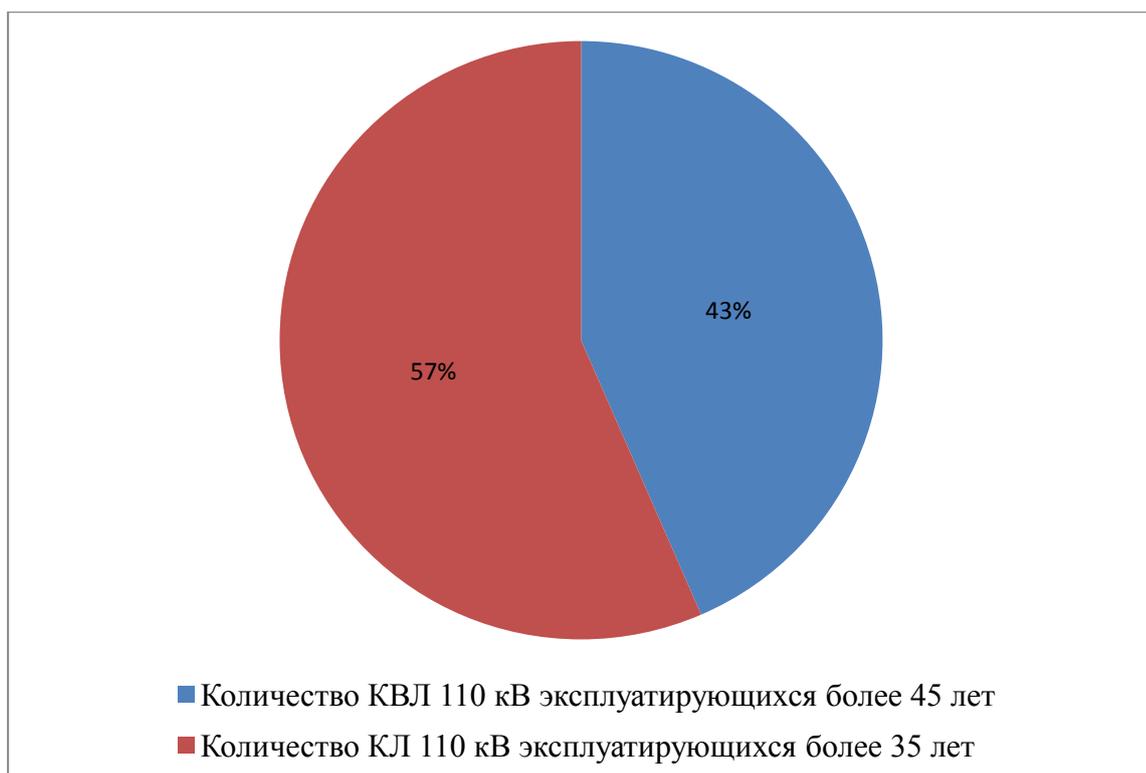


Рисунок 1.7 — Процентное отношение КЛ и КВЛ 110 кВ, эксплуатирующихся сверх нормативного срока эксплуатации

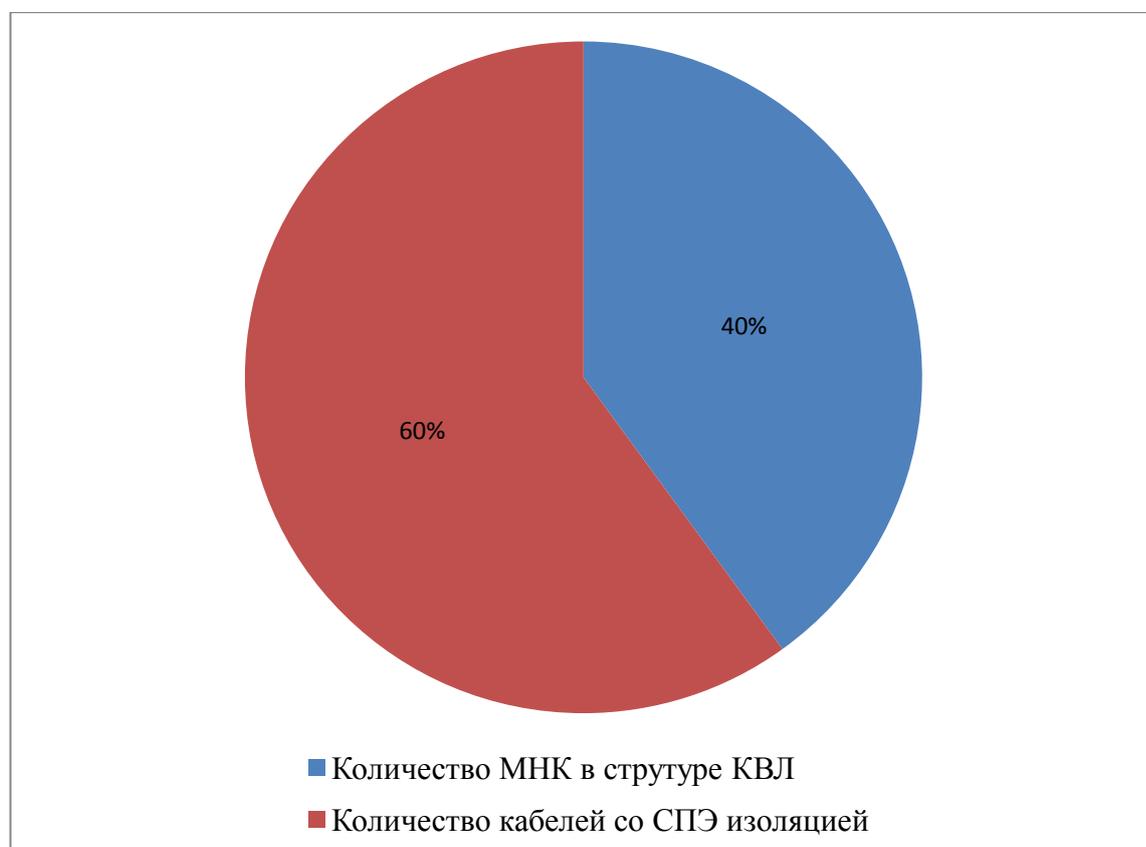


Рисунок 1.8 — Процентное отношение МНК в структуре КВЛ 110 кВ

1.2.4 Определение критериев состояния СЭС города и требования к надежности СЭС

На рисунке 1.9 для наглядности представлены суммарные длины линий электропередачи 110-500 кВ проходящие по территории города Москвы. Нетрудно заметить, что длина линий напряжением 110 кВ гораздо больше, чем линии других классов напряжения (ВЛ 110 кВ составляет 967 км, а КЛ 110 кВ составляет 681 км). Это связано с тем, что при развитии энергетической отрасли в нашей стране 110 кВ было первым высоким классом напряжения, которое получило широкое распространение независимо от того, что в последнее время замечена тенденция повышения уровня напряжения для снижения потерь и повышения пропускной способности линий. Данная диаграмма отчетливо показывает, что еще большее количество воздушных линий напряжения 110 и 220 кВ существует в черте города и их перевод в кабельное исполнение займет существенное количество времени (протяженность ВЛ 220 кВ составляет 681 км, а протяженность КЛ 220 кВ составляет 598 км). Проведение реконструкции такого широкого масштаба в одночасье не возможно по экономическим, техническим и ряду других причин.

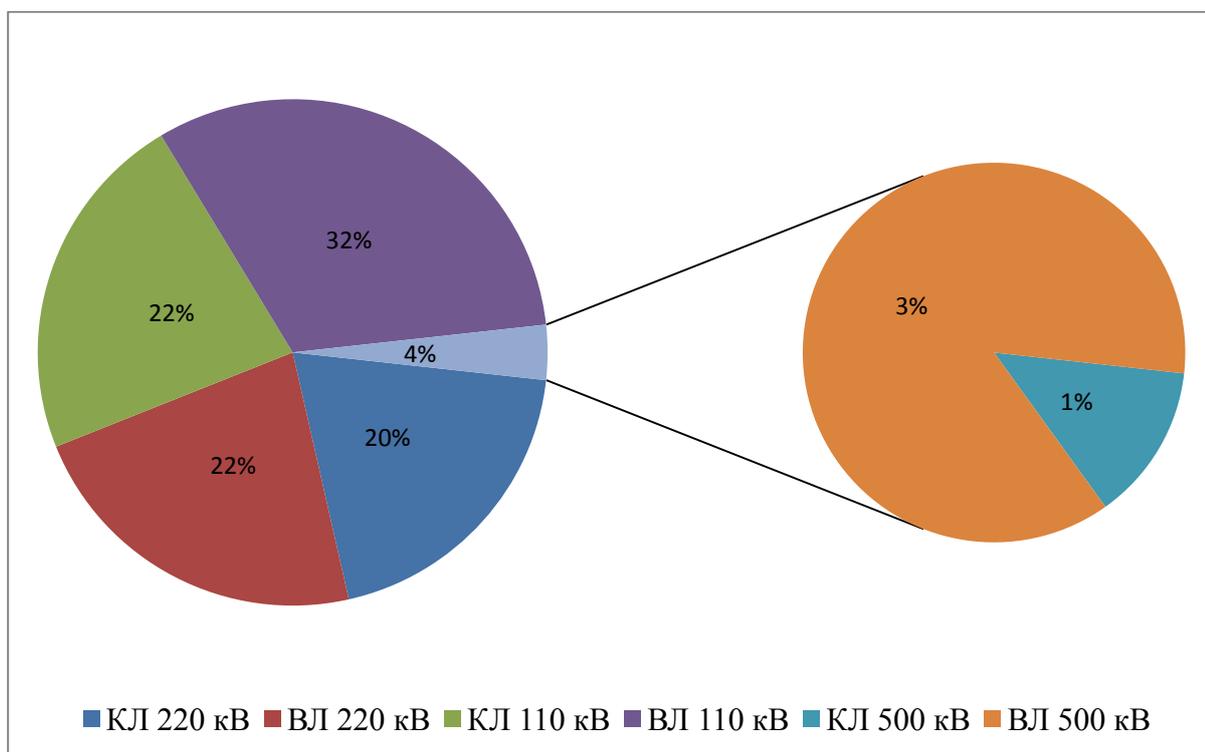


Рисунок 1.9 — Процентное отношение линий электропередачи 110-500 кВ в городе Москва

Основными компаниями, которые занимаются эксплуатацией линий электропередачи 110-500 кВ на территории города Москвы являются: ПАО «МОЭСК»,

АО «ОЭК», АО «Энергокомплекс», ПАО «ФСК ЕЭС», а так же так называемые абонентские ЛЭП, которые эксплуатируются непосредственно абонентами, к ним относятся АО «Аэропорт Внуково», ГУП «Московский метрополитен и ряд других мене крупных организаций. Для наглядного представления на рисунке 1.10 показано процентное отношение линий электропередачи, эксплуатирующихся различными организациями. Как несложно заметить большую часть линий 110-500 кВ эксплуатирует ПАО «МОЭСК», а именно 81% от общей длины ВЛ и КЛ (суммарной длиной около 2400 км). Компании АО «ОЭК» и АО «Энергокомплекс» эксплуатируют около 6% линий каждая (около 180 км «ОЭК» и соответственно около 160 км «Энергокомплекс»).

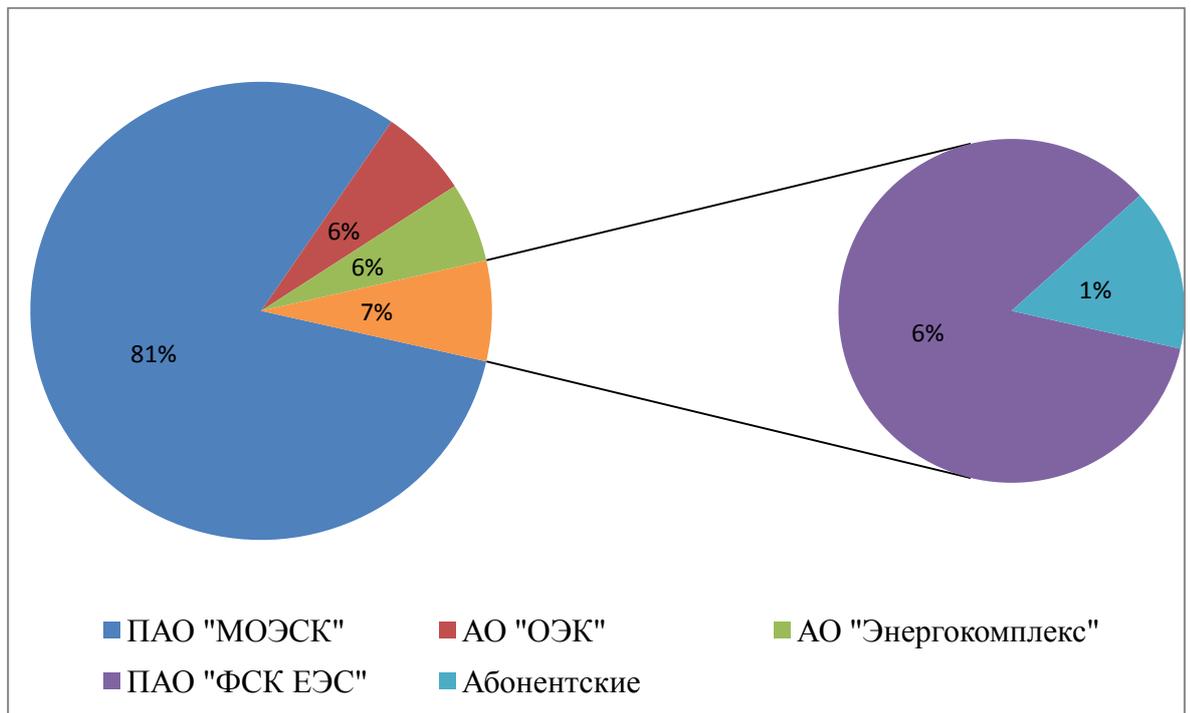


Рисунок 1.10 — Распределение высоковольтных ЛЭП по эксплуатирующим организациям

Таким образом, подводя итог всему вышесказанному можно заметить, что по состоянию на 2015 г. на территории города Москвы более 40 лет эксплуатируются линии: ВЛ 500 кВ — 100%, ВЛ 220 кВ — $\approx 70\%$, ВЛ 110 кВ — $\approx 93\%$, КЛ 220 кВ — $\approx 2\%$, КЛ 110 кВ — $\approx 24\%$. Общее число трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на подстанциях в черте города, различных классов напряжения: для 110 кВ — 260 шт. (59% из них эксплуатируются более 25 лет), для 220 кВ — 160 шт. (16% из них эксплуатируются более 25 лет), для 500 кВ — 13 шт. (23% из них эксплуатируются более 25 лет). Из-за этого энергетика города Москвы не может в полной мере отвечать всем требованиям, предъявляемым к системам электроснабжения.

Система электроснабжения (СЭС) должна обеспечивать высокий уровень надежности и бесперебойности электроэнергии надлежащего качества. Главными требованиями к энергосистеме являются:

а. безопасность. СЭС и все ее элементы без исключения должны быть выполнены так, чтобы они не создавали никакой опасности для жизни и здоровья людей;

б. экологичность. СЭС в разных режимах (нормальных и аварийных), при проведении различного рода работ (строительство, монтаж, ремонт) не должна приводить к загрязнению окружающей среды;

в. надежность. Всего существует 3 категории надежности потребителей электрической энергии;

1) к I категории электроснабжения относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения. Так же выделяется особая группа электроприемников, работа которых необходима для безаварийного останова производства, предотвращения пожаров и так далее. Особенностью данной группы является наличие не менее двух независимых источников питания (ИП), при этом прекращение подачи электроэнергии не должно превышать время автоматического переключения;

2) ко II категории надежности относятся электроприемники, перерыв в работе которых может привести к значительному снижению отпуска производимых товаров, простоя производственного оборудования или отразится на нормальной жизнедеятельности большого количества граждан. Особенностью является наличие двух независимых источников питания, при этом прекращения подачи электроэнергии с одного ИП допускается на время ручного переключения на второй ИП;

3) к III категории надежности относятся электроприемники, которые не вошли в I и II категории. К ним относятся жилой фонд, магазины, маленькие производственные помещения, офисы и т.д. Перерыв электроснабжения потребителей данной категории допускается не более 24 часов за один раз или суммарно за год не более 72 часов;

г. качество электрической энергии. Всего нормируется 9 показателей качества электроэнергии, таких как;

1) отклонение частоты. В синхронизированных системах отклонение не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю. Для изолированных систем устанавливается норма ± 1 Гц для 95% времени за неделю и ± 5 Гц для 100% времени за неделю;

2) медленное изменение напряжения. Как правило, обусловлено изменением нагрузки электрической сети. Для сетей среднего и высокого напряжений нормируется согласованное напряжение электропитания. Отклонение не должно превышать $\pm 10\%$ напряжения при 100% временном интервале в течение одной недели;

3) провалы напряжения, перенапряжения и т. д. Чаще всего происходят из-за неисправности в элементах электрической сети (кабельные и воздушные линии электропередачи, трансформаторы и т. д.) и при подключении мощных нагрузок. Перенапряжения возникают, как правило, при подключении и отключении нагрузки, а так же при коротком замыкании;

д. экономичность системы. Во время проектирования и реконструкции СЭС требуется оценивать технико-экономические показатели рассматриваемого объекта. Необходимо грамотно учесть стоимость возведения и эксплуатационных издержек для надежного функционирования системы в целом;

е. возможность развиваться во времени. В связи с тем, что большое количество оборудования морально и физически устарело СЭС не может принять на себя нагрузку новых потребителей. Данная проблема остро стоит во многих частях России, а особенно в крупных и динамически развивающихся городах миллионниках, таких как: Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и др. Для этого при проектировании и реконструкции должна учитываться возможность расширения и развития энергетической системы.

1.3 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗВИТИЯ СЭС ГОРОДА МОСКВЫ НА ПЕРСПЕКТИВУ С УЧЕТОМ РЕИНОВАЦИИ

1.3.1 Многокритериальные задачи по улучшению показателей СЭС города Москвы

В связи с тем, что система электроснабжения не удовлетворяет всем требованиям, электрические сети города Москвы нуждаются в реконструкции, для этого была разработана программа развития энергетики Москвы с 2016 по 2021 гг. Основной целью для успешного развития и функционирования электроэнергетической системы города Москвы является создание экономически результативного, активно развивающегося и устойчивого энергетического хозяйства, которое имеет передовые технологии, а так же специалистов высокого уровня, учитывая все особенности данного региона. Для достижения данной цели необходимо решить ряд основных задач:

1. требуется повысить надежность источников электрической энергии с применением существующих резервов мощности в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах;
2. увеличить скорость при замене и восстановлении оборудования, которое превысило срок эксплуатации;
3. усилить взаимосвязь с ОЭС Центра для получения дополнительной мощности;
4. повысить эффективность топливно-энергетических ресурсов, используемых для выработки электрической энергии, снижений потерь в элементах электрической сети;
5. улучшить экономические и экологические показатели действующих объектов энергетики.

При постройке новых и реконструкции старых электрических сетей напряжением 110 кВ и выше следует учитывать все требования, предъявляемые к системам электроснабжения и динамику развития региона. В связи с тем, что город Москва быстроразвивающийся мегаполис при проектировании должны быть учтены следующие моменты:

1. Электрическая система должна быть гибкой для осуществления постепенного развития сети и приспособления в условиях изменяющейся нагрузки, а так же при развитии электростанций, входящих в СЭС города.

2. Распределительная сеть должна иметь высокую степень надежности электроснабжения потребителей с сохранением нагрузки, а так же не снижающимися показателями качества электрической энергии независимо от того, работает ли вся схема или отключена одна из линий или один из трансформаторов (автотрансформаторов).

3. В связи с высокой плотностью нагрузки в отдельных местах города для обеспечения надежного энергоснабжения нужно учитывать одновременную работу электростанций системы совместно с локальными источниками малой мощности до 100 МВт. Данные источники должны обеспечивать требуемый уровень показателей качества электрической энергии не только при параллельной работе с энергосистемой, но и при независимой работе на выделенные объекты.

4. Так как напряжение 110 кВ не является системообразующим для города Москвы, то при замене данного электрооборудования следует увеличивать класс напряжения до 220 кВ. Таким образом, удастся увеличить пропускную способность линий и снизить потери в элементах сети.

5. При реконструкции воздушные линии переводить в кабельные линии с высокой пропускной способностью. В местах плотной городской застройки использовать подстанции (ПС) закрытого типа с применением элегазового оборудования в распределительных устройствах (РУ) высшего напряжения.

По состоянию на 2020 год проведено перевооружение и реконструкция ПС 500 кВ Чагино, КЛ 220 кВ Магистральная — Белорусская №1,2, ПС 220 кВ Белорусская и ряда других объектов энергетического хозяйства города Москвы. Проводится реконструкция ПС 220 кВ Сабурово, ПС 110 кВ Чоботы, ВЛ 110 кВ Измайлово — Восточная и другие. Суммарно с 2016 по 2021 гг. планируется реконструировать 186,2 км линий (из них 220 кВ — 29 км и 157,2 км 110 кВ), которые числятся на балансе ПАО «МОЭСК». Всего к 2021 году намечается ввести в строй и провести реконструкцию 388 км линий электропередачи. Инвестиции на реконструкцию и возведение новых объектов в большинстве своем выделяются эксплуатирующими организациями, а так же сторонними инвесторами.

1.3.2 Определение требований для использования «Ситикабеля»

Как уже неоднократно было сказано выше, электрические сети города Москва характеризуются высоким процентом износа оборудования. Данная проблема присутствует не только в Московском регионе, но и во всей энергосистеме страны в целом. Помимо всего прочего, Москва является быстроразвивающимся мегаполисом с чрезвычайно высокой плотностью городской застройки, а так же большой насыщенностью подземными коммуникациями. В связи с этим при проведении реконструкции кабельных линий можно столкнуться с рядом проблем, таких как:

1. невозможность прокладки кабельной линии в связи с большим количеством коммуникаций, которые нельзя обойти;
2. увеличение длины линии, а соответственно и стоимости;
3. увеличение количества согласующих организаций и т. д.

Таким образом, при реконструкции кабельных линий оптимальным путем является прокладка кабеля по существующей трассе. Особенно данное решение позволяет решить проблему замены маслонаполненных кабелей высокого давления. Благодаря этому решению при строительстве линии будет минимизировано влияние на эстетический облик города, а так же снижен риск повреждения уже существующих коммуникаций. Для данных целей подходит кабель «Ситикабель», производства немецкой фирмы NKT cables, который был специально разработан для замены маслонаполненных кабелей.

При реконструкции кабельных линий, выполненных маслонаполненными кабелями высокого давления, эксплуатирующие организации выдают техническое задание, в котором может быть указа конкретная марка кабеля. Например, при реконструкции маслонаполненной линии, проложенной в зоне плотной городской застройки и устоявшимся обликом города, от подстанции 110 кВ «А» до подстанции 110 кВ «Б» требуется определить на этапе проектирования возможность применения кабеля типа «Ситикабель» с возможностью прокладки в существующем стальном трубопроводе высокого давления. Существующая линия выполнена маслонаполненным кабелем высокого давления, сечение кабеля 625 мм^2 , диаметр стального трубопровода 168/8 мм. Переустроенная линия должна иметь большую или равную маслонаполненной линии пропускную способность. Ниже представлен перечень требований для проектирования КЛ с использованием «Ситикабеля».

1. Для реконструкции КЛ 110 кВ «А» — «Б» №1, №2 от ПС «А» до ПС «Б» применить трехжильный кабель с многопроволочной медной жилой с продольной герметизацией, с радиальной и продольной герметизацией по изоляции, изоляцией из сшитого полиэтилена и общей броней из стальных проволок с возможностью прокладки в существующем трубопроводе высокого давления (типа «Ситикабель»). В конструкции кабеля должна быть предусмотрена возможность интеграции оптоволоконных кабелей для оценки его характеристик и создания резервных каналов передачи данных: 2 модуля, содержащие по 4 оптоволоконных проводника в многомодовом исполнении (выполненных по стандарту МСЭ-Т G.651), используемые в качестве датчика в системе мониторинга температуры кабелей, и 12 в одномодовом исполнении (выполненные по стандарту МСЭ-Т G.652) в каждом. Все модули должны иметь маркировку.

При прокладке ремонтное отключение цепи не должно приводить к отключению второй цепи.

2. Конструкция кабеля должна обеспечивать термическую стойкость к токам короткого замыкания для КЛ 110 кВ.

Величину тока короткого замыкания определить проектом.

3. Проектируемый кабель проложить в существующих стальных трубах высокого давления КЛ 110 кВ «А» — «Б» №1, №2 после демонтажа старого кабеля. При соединении строительных длин кабеля использовать существующие соединительные колодцы КЛ 110 кВ. При невозможности соединения в существующих колодцах необходимо построить новые монолитные железобетонные соединительные колодцы.

4. При проектировании учесть минимально возможные сроки реконструкции.

5. Учесть в сметах резервное оборудование для каждой КЛ 110 кВ: 6 соединительных муфт, 1 концевую муфту, 1 элегазовый ввод, одной резервной длины (не менее 100 м) силового кабеля 110 кВ, используемого при прокладке на металлическом барабане с зашивкой (при использовании кабелей разного сечения предусмотреть резервную длину для каждого из применяемых сечений).

6. Сечение жилы кабеля должно быть выбрано исходя из обеспечения требуемой пропускной способности, с учетом перспективы развития сети и проектных условиях прокладки.

7. Для КЛ 110 кВ предпочтительно применить концевые муфты сухого исполнения. При использовании металлоконструкций для установки концевых муфт, выполнить их с

цинковым антикоррозионным покрытием методом горячего заводского цинкования, остальные металлоконструкции, а так же места сварки — загрузить и покрасить.

Концевые муфты должны быть выполнены с полимерными изоляторами.

Для крепления кабеля к стойкам концевых муфт использовать полимерные хомуты.

Обеспечить защиту кабеля от механических повреждений в месте выхода из земли к концевым муфтам полиэтиленовыми трубами на высоту 0,5 м под и над землей с герметизацией над землей.

Выход кабеля из земли на стойки концевых муфт обеспечить под прямым углом относительно земли с его центровкой и герметизацией в трубе ПНД.

Для выполнения эксплуатационных работ в цепях мониторинга температуры КЛ предусмотреть проектом облегченные, быстросъемные инвентарные леса, с передачей их в эксплуатирующую организацию.

8. При наличии заходов в КРУЭ необходимо обеспечить возможность стыковки элегазовых вводов с КРУЭ. Для возможности проведения ремонтно-восстановительных работ в период эксплуатации обеспечить возможность стыковки/расстыковки элегазовых вводов с КРУЭ. Обеспечить возможность проведения высоковольтных испытаний постоянным напряжением и испытаний оболочек кабелей без расстыковки элегазового ввода и ячейки КРУЭ.

Выполнить контур заземления элегазовых вводов медными шинами.

9. Тип кабеля и кабельной арматуры дополнительно согласовать с эксплуатирующей организацией. Применяемая кабельная продукция должна быть аттестована в эксплуатирующей организации.

10. Разместить соединительные муфты в соответствии с инструкцией завода-изготовителя кабеля и арматуры, инструкциями по прокладке и монтажу КЛ. Места размещения муфт согласовать с эксплуатирующей организацией.

11. Требуется получить письменное подтверждение завода-изготовителя кабеля об обеспечении требуемой пропускной способности кабельной линии, при соблюдении предусмотренных проектами условий прокладки, а так же о технологическом соответствии кабеля и кабельной арматуры от различных производителей. Согласовать проект с заводом-изготовителем кабеля.

12. При проектировании предусмотреть установку системы мониторинга частичных разрядов, систему мониторинга температуры
13. Объем демонтажа определить на стадии проектирования и согласовать с эксплуатирующей организацией.
14. После завершения работ по реконструкции КЛ 110 кВ провести высоковольтные испытания кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с измерением частичных разрядов.

Данные требования разработаны специально для «Ситикабеля», но многие специалисты никогда не сталкивались с таким типом кабеля, так как для нашей страны данное изделие уникально. В связи с этим требуется осветить данную тему и рассказать о его преимуществах и показать когда данный кабель целесообразно применять.

2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 110 кВ

2.1 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СЛОЖНОЗАМКНУТЫХ СЕТЯХ

Рабочим режимом считается условное установившееся состояние сети (на самом деле оно меняется постоянно из-за режимов работы приемников электрической энергии). Основная цель расчета - проверка выполнения технических условий. Проверяются токи и мощности в элементах сети, а так же напряжения в узлах. Определяются потери электрической энергии за год.

Для упрощения ручного расчета режимов используют разложение на симметричные составляющие. Составляются расчетные схемы для прямой, нулевой и обратной последовательности. Симметричный режим это частный случай. По сути, это режим прямой последовательности основной частоты, определяющий условия электроснабжения потребителей. Исходными данными для расчета являются параметры рассматриваемой сети, значения активной и реактивной нагрузки и напряжение в одном узле. Расчет начинают с построения распределения полной мощности в элементах сети, таким образом определяют мощности в начале и конце каждого элемента. Одновременно с этим учитывают потери мощности в сопротивлениях, влияние проводимости и мощности, потребляемой нагрузками.

Расчет режима требуется для выбора оптимального сечения кабеля или провода воздушной линии. Существует несколько критериев при выборе сечения питающей линии.

1. Выбор сечений жил кабеля по экономической плотности тока проводится по формуле 2.1.

$$S = \frac{I_p}{j_{\text{ЭК}}}, \quad (2.1)$$

Где S — полная мощность, передаваемая по линии, МВА;

I_p — расчетный ток линии, А;

$j_{\text{эк}}$ — нормированное значение экономической плотности тока, А/мм² (зависит от типа применяемого кабеля/провода, материала проводника и от числа часов использования максимума нагрузки)

Рабочий ток линии рассчитывается по следующей формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} * U_n * \cos\varphi}, \quad (2.2)$$

Где U_n — номинальное напряжение питающей линии, кВ;

S_p — расчетная мощность, передаваемая по линии, МВА;

$\cos\varphi$ — коэффициент активной мощности.

Сечение, полученное из формулы 2.1, округляют до ближайшего большего стандартного сечения.

2. Выбор сечения жил кабеля по нагреву расчетным током проводится по формуле 2.3.

При выборе сечения кабеля следует учитывать, что характеристики кабелей, указанные в таблицах, рассчитаны на температуру почвы 15°C или температуру воздуха 25°C. Если условия отличаются, то требуется вводить поправочные коэффициенты в расчеты, такие как: температурный коэффициент k_1 и коэффициент, учитывающий количество кабелей в траншее k_2 . Тогда величина длительно допустимого тока равна:

$$I'_{\text{доп}} = k_1 * k_2 * I_{\text{доп}}, \quad (2.3)$$

Где $I_{\text{доп}}$ — длительно допустимый ток для кабеля, выбирается по справочным данным, А;

k_1 — коэффициент, учитывающий температуру почвы;

k_2 — коэффициент, учитывающий количество кабелей в траншее.

Для правильного выбора сечения кабеля должно выполняться неравенство:

$$I_{p\text{max}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (2.4)$$

Где $I_{p\text{max}}$ — наибольший расчетный ток, из всех режимов работы, А;

$I_{\text{доп}}$ — длительно допустимый ток для кабеля, выбирается по справочным данным, А.

Если условие 2.4 не выполняется с выбранным сечением кабеля, то выбирается следующее ближайшее большее сечение и проверка проводится до тех пор, пока не будет выполняться условие.

3. Выбор сечения жил кабеля по нагреву током короткого замыкания проводится по формуле 2.5.

Проверяются только кабели, защищаемые релейной защитой. Те кабели, которые защищаются плавкими вставками, не проверяются, так как плавкая вставка разрушится быстрее, чем кабель успеет нагреться до критической температуры.

Сечение, термически стойкое к токам КЗ определяется по формуле:

$$S_T = I_{\infty} * \frac{\sqrt{t_{\pi}}}{K_T}, \quad (2.5)$$

Где I_{∞} — установившееся значение тока короткого замыкания, кА;

t_{π} — приведенное время КЗ;

K_T — температурный коэффициент, учитывающий ограничение допустимой температуры нагрева жил кабеля.

Приведенное время КЗ определяется как:

$$t_{\pi} = t_{\pi a} + t_{\pi п}, \quad (2.6)$$

Где $t_{\pi a}$ — аperiodическая составляющая времени КЗ;

$t_{\pi п}$ — периодическая составляющая времени КЗ.

4. Выбор сечения жил кабеля по потере напряжения проводится по формуле 2.7.

Выбранное сечение проверяется по потере напряжения. Потерю напряжения можно вычислить по формуле:

$$\Delta U = \frac{(P * r_0 + Q * x_0) * l}{U_{ном}}, \quad (2.7)$$

Где P — активная мощность, кВт;

Q — реактивная мощность, кВар;

r_0 — активное сопротивление кабеля, Ом/мм²;

x_0 — индуктивное сопротивление кабеля, Ом/мм²;

l — длина линии, км

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение линии, кВ.

Для удобства восприятия потери напряжения выражают в процентах от номинального по формуле:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} * 100\%, \quad (2.8)$$

Где ΔU — рассчитанная потеря напряжения, В.

Для нормального режима работы считаются приемлемыми потери напряжения до 5% от номинального.

5. Проверка на механическую прочность кабелей не проводится. Усилия тяжения кабеля не должны превышать паспортные значения, для уточнения усилий тяжения проводится специальный расчет.

Основной формулой, с которой начинают расчет сечения кабеля, является 2.1, а по остальным проводят проверку и если по любой другой формуле сечение получается больше первого, то выбирается большее из сечений.

Данный расчет удобен для учебных целей, когда сеть не имеет сильного разветвления. Но их можно так же использовать для расчета более сложных сетей, только займет это больше времени. Для более сложных сетей существуют другие методики расчета.

Большинство высоковольтных линий электропередачи в городе Москве выполнены по сложноразветвленной сети. Это сделано для того, чтобы повысить надежность электроснабжения потребителей, так как питание узлов осуществляется с трех и более сторон. Таким образом, сеть имеет не менее двух независимых контуров. Естественно, такая энергетическая система очень сложна, но, тем не менее, для проектирования и эксплуатации требуется знать параметры установившихся электрических режимов. К ним относятся ток, напряжение в узлах, потери мощности в элементах электрической сети, мощность. Определение данных параметров можно проводить вручную, но учитывая сложность схем не трудно догадаться, что это займет большое количество времени. Для расчета электрических режимов сети применяются методы:

а. Метод преобразования схемы. При использовании данного метода сложноразветвленную сеть преобразовывают к упрощенному виду, например

кольцевой или разомкнутой сети. Нагрузки сети разносят по концам участка, а так же из центра звезды, объединяя концевые источники питания и нагрузок. Метод преобразования схемы применяется при соблюдении условия постоянства параметров для установившегося режима сети. При разносе нагрузок необходимо следить, чтобы параметры режима не преобразованной части оставались неизменными. Если пользоваться данным методом при ручном расчете, то будет потрачено большое количество времени (в зависимости от количества элементов).

б. Метод контурных уравнений. При использовании данного метода составляются и решаются системы контурных уравнений. Уравнения можно записывать в форме токов или мощностей. Количество уравнений должно совпадать с количеством контуров в рассматриваемой схеме. Данный метод основывается на использовании I и II законов Кирхгофа. При составлении системы уравнений нужно придерживаться правил:

1) граф сети составляется с выделением дерева сети и хорд;

2) находятся независимые контуры, а так же количество контурных уравнений, которые соответствуют числу хорд в сети. Количество независимых контуров для схемы находится в зависимости от количества узлов в схеме, не считая балансирующего и количества линий;

$$k = m - (n - 1), \quad (2.9)$$

Где k — количество независимых контуров;

m — количество линий;

n — количество узлов

3) проводится выбор направления обхода в контурах, задаваемый направлением контурных токов, которые протекают в хордах;

4) определяются собственные сопротивления для каждого контура как сумма сопротивлений всех ветвей в контуре;

5) выбираются знаки и определяются значения взаимных сопротивлений контуров, оно равно сумме сопротивлений ветвей, которые одновременно входят в два соседних контура. Если контурные токи совпадают, то знак взаимных сопротивлений положительный, если встречное направление контуров тока, то знак отрицательный;

б) в каждое контурное уравнение входят: контурный ток, который умножается на сопротивление контура; контурные токи от соседних контуров, которые умножаются на взаимные сопротивления данного контура с соседними контурами при сохранении знаков; свободный член от каждого уравнения.

При решении полученных уравнений ручным способом тратится большое количество времени.

в. Метод узловых напряжений. При использовании данного метода требуется составить системы уравнений узловых напряжений и на их основе определить параметры установившегося режима сети. Количество уравнений узловых напряжений равно числу узлов в данной сети без учета балансирующего узла ($n - 1$).

Узловые уравнение составляются для связи неизвестных напряжений в узлах сети с известными токами нагрузки при использовании параметров схемы замещения сети. На схеме обозначаются токи в ветвях I_{ij} и токи в узлах I_{ki} , а так же их направления.

Пользуясь I законом Кирхгофа, записываются уравнения баланса линейных токов для каждого узла сети, за исключением балансирующего и с учетом направления токов.

В полученных уравнениях неизвестные токи ветвей выражаются через напряжения в узлах и проводимости ветвей.

Решение полученных уравнений ручным способом занимает большое количество времени.

г. Метод коэффициентов распределения. При использовании данного метода предварительно требуется определить коэффициенты распределения сети. Они меняются при изменении схемы или параметров сети, благодаря этому метод показывает высокую эффективность при расчетах установившегося режима сети с постоянной схемой, но меняющимися нагрузками в узлах.

Мощности, текущие в ветвях схемы определяются как:

$$\bar{P}_B = C * \bar{P} \quad (2.10)$$

$$\bar{Q}_B = C * \bar{Q} \quad (2.11)$$

Где \bar{P}_b, \bar{Q}_b — векторы столбцы активной и реактивной мощности ветвей;

\bar{P}, \bar{Q} — векторы столбцы активной и реактивной мощности нагрузок подстанции;

C — матрица коэффициентов распределения.

Матрица коэффициентов распределения вычисляется по формуле:

$$C = Y_b * M_t * Y_y^{-1}, \quad (2.12)$$

Где Y_b — диагональная матрица проводимости ветвей;

M_t — транспонированная первая матрица инцидентий;

Y_y — матрица узловых проводимостей;

Y_y^{-1} — матрица, обратная матрице Y_y .

$$Y_y^{-1} = (M * Y_b * M^T)^{-1} \quad (2.13)$$

Диагональные элементы матрицы Y_b равняются проводимостям ветвей графа рассматриваемой сети. Проводимости ветвей являются обратным значением длины линий.

Номер строки i матрицы M соответствует номеру узла графа, а номер столбца j — номеру ветви. Элементы матрицы M определяются по правилу: элемент матрицы m_{ij} равен 1, при условии, что узел i начальная вершина ветви j ; равен -1, при условии, что узел i конечная вершина ветви j ; равен 0, при условии, что узел i не является вершиной ветви j . В матрице M количество строк равняется количеству узлов минус 1, принимаемый балансирующим. Элементы транспонированной матрицы M определяются как $m_{ij}=m_{ji}$.

Данный метод относительно прост при использовании программ для расчета матриц.

д. Метод разрезания контуров. При использовании данного метода обычно рассчитывают сложнзамкнутые сети. Сложнзамкнутую сеть требуется привести к разомкнутому виду и рассчитать полученную сеть. Метод достаточно простой и с его помощью можно рассчитывать вручную небольшие схемы либо более крупные системы с применением ПК.

При использовании метода нужно разомкнуть контура рассчитываемой сложнзамкнутой сети и провести расчет полученных разомкнутых схем. Значения

для установившегося режима сложнозамкнутой сети будут одинаковы с значениями режима получившейся разомкнутой сети, при условии неизменности напряжения в точках разрезания.

При ручном расчете метод очень трудоемок.

е. Метод расщепления сети. При использовании данного метода исходная сложнозамкнутая сеть разбивается на две сети, первая предназначена для распределения только активных мощностей, а вторая только для реактивных. Выбирается условный обход контуров и для каждого контура составляются уравнения для активной и реактивной составляющей с учетом влияния соседнего контура. После подстановки значений и преобразования уравнений находится искомое потокораспределение.

Метод относительно прост при ручном расчете.

В связи с тем, что реальные системы электроснабжения являются сложными и обладают большим количеством структурных элементов, их расчет занимает достаточно большое количество времени. Для экономии времени и точности расчетов установившихся режимов сети используются компьютерные программы. В настоящее время существует не малое количество программных комплексов, таких как: RastrWin (разработка ООО «Фонд кафедры АЭС им. Д. А. Арзамасцева» г. Екатеринбург), Mustang (ВДЦ Балтии, Латвия), DAKAR (ELEKS Software Представительство СНГ Львов, Украина) и другие программные комплексы, произведенные в Германии, Бельгии, России. В большинстве своем в проектных институтах используется программа RastrWin.

2.2 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RastrWin

Программный комплекс RastrWin3 служит для расчета, анализа и оптимизации режимов работы электроэнергетических систем. Максимальный объем схемы для расчета — 32000 узлов. Программа используется более чем в 200 организациях на территории России, а так же стран СНГ. В программе собраны различные функции, такие как:

1. возможность расчетов установившихся режимов электрических сетей с различной конфигурацией и сложностью, на напряжения от 0,4 до 1150 кВ,

проводится расчет всех параметров режима: ток, напряжение, мощность, потери мощности для всех узлов заданной схемы;

2. возможность расчета установившихся режимов с учетом частоты сети;
3. возможность самопроверки первоначальных данных на противоречия логике и физике;
4. возможность составления схемы замещения для рассчитываемой электрической сети;
5. возможность анализа и проведения оптимизации сетей по напряжению и потерям мощности;
6. возможность расчета положений регулирования под напряжением (РПН) трансформаторов и положений вольт добавочных трансформаторов (ВДТ), а так же принимать во внимание изменения сопротивления автотрансформаторов (АТ) при изменении положения РПН;
7. возможность расчета максимальных режимов энергосистемы по передаваемой мощности, а так же определение критических сечений ЛЭП;
8. возможность проведения анализа потерь электрической мощности, а так же определять характер, оборудование и уровни напряжения, в которых высокая доля потерь;
9. возможность расчета различных аварийных ситуаций;
10. возможность проведения симуляции отключения ЛЭП, в том числе и одностороннего;
11. возможность создания модели генераторов и задание их PQ-диаграмм;
12. возможность создания зависимости $Q_{\max}(V)$ генератора при учете ограничений токов ротора и статора;
13. возможность создания моделей шинных и линейных реакторов, а так же отключать их по необходимости;
14. возможность проведения анализа токовой нагрузки для линий и трансформаторов даже при учете зависимости допустимого тока от температуры;

15. возможность расчета коэффициентов сети для оценки влияния изменения входных параметров на конечный результат расчета;
16. возможность вычисления потребления, генерации внешних перетоков;
17. возможность сопоставления разных электрических режимов по выбранному количеству данных.

Система графического отображения позволяет создавать «с нуля» однолинейные электрические схемы и экспортировать в формат dwg. После расчета на схеме мгновенно отображаются вычисленные параметры. Табличный процессор — главный элемент управления. В программе имеются двухуровневые таблицы, которые полностью настраиваются. Благодаря встроенной системе отображения графиков можно визуальное представить любой изменяющийся параметр, так же возможно одновременное отображение нескольких графиков. Присутствует поддержка вывода данных в программу Microsoft Office Excel, что существенно упрощает формирование отчета.

Таким образом, можно сделать вывод, что программный комплекс RastrWin обладает рядом достоинств:

1. интуитивно понятный и простой интерфейс;
2. при расчете режимов имеется возможность использовать разные алгоритмы;
3. для сокращения времени работы можно создавать макросы для формул;
4. возможность экспорта и импорта в Microsoft Office Excel и AutoCAD.

Принимая во внимание вышеперечисленные достоинства можно с уверенностью утверждать, что программный комплекс RastrWin наиболее выгодно использовать при расчете установившихся режимов и для оптимизации электрических режимов работы сети.

2.3 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ RastrWin

Существующая кабельная линия 110 кВ от подстанции «А» до подстанции «Б» выполнена маслонаполненным кабелем высокого давления, сечением 625 мм². Длительно допустимая токовая нагрузка для кабеля данного сечения составляет 604 А. Проведем

расчет токовой нагрузки с помощью программного комплекса RastrWin для нормального режима работы (Рисунок 2.1), отключение линии «А-Б» №1 (Рисунок 2.2), отключение линии «А-Б» №2 (Рисунок 2.3). Результаты расчета занесены в таблицу 2.1. Данный расчет приведен для того, чтобы показать, что при замене существующего МНК высокого давления на «Ситикабель», последний не уменьшит пропускную способность, а наоборот позволит частично ее увеличить.

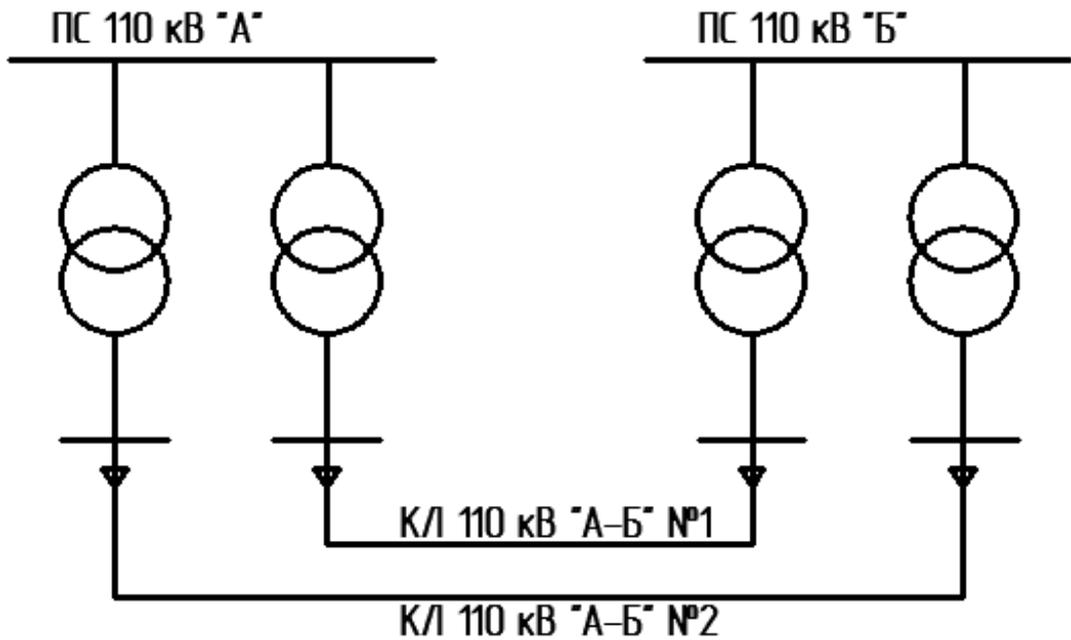


Рисунок 2.1 — Нормальный режим работы линии «А-Б»

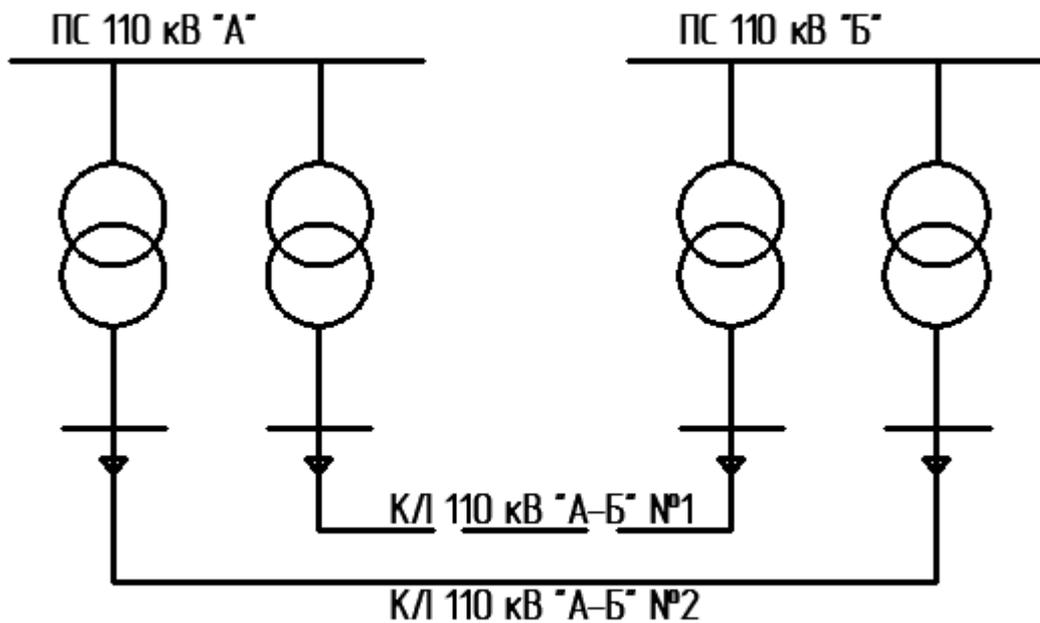


Рисунок 2.2 — Отключена линия «А-Б» №1

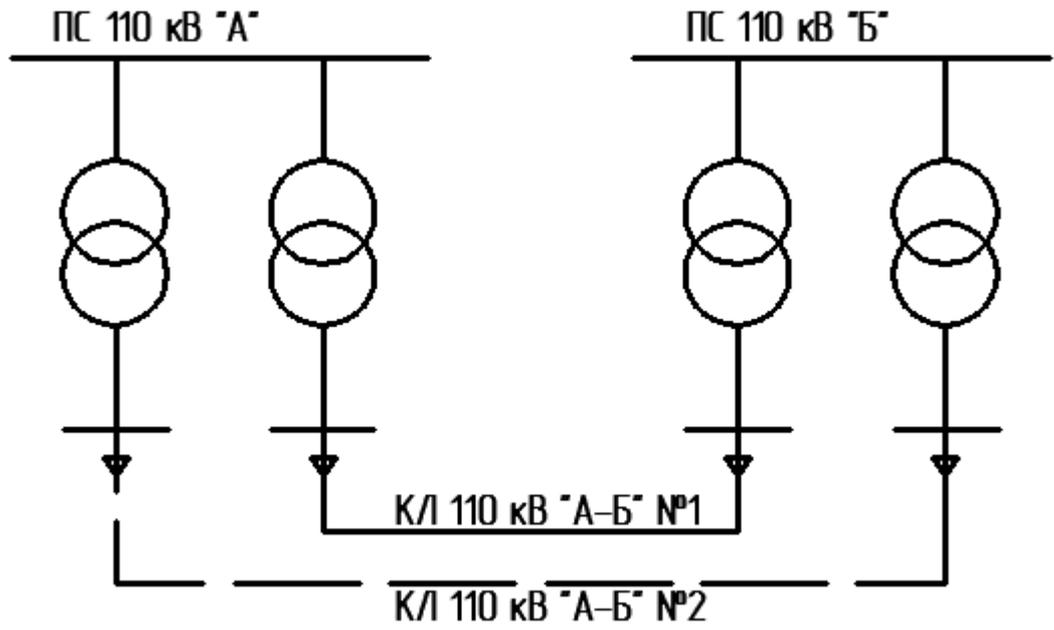


Рисунок 2.3 — Отключена линия «А-Б» №2

Таблица 2.1 — Результаты расчета режимов работы КЛ 110 кВ «А-Б» №1, 2¹

Режим работы	Нормальный режим		Отключена линия «А-Б» №1		Отключена линия «А-Б» №2	
	Значение тока (I), А	Ток (I) в % от номинального, %	Значение тока (I), А	Ток (I) в % от номинального, %	Значение тока (I), А	Ток (I) в % от номинального, %
КЛ 110 кВ «А-Б» №1	172	28,5	—	—	314	52
КЛ 110 кВ «А-Б» №2	134	22,2	313	51,8	—	—

1 — Расчет проведен по данным контрольного замера зимы 2019 г.

Как видно из таблицы 2.1, самым тяжелым режимом работы для линий является отключение одной из линии. Для КЛ «А-Б» №1 при отключении «А-Б» №2 ток равен 314 А, что составляет 52% от номинального тока, а для КЛ «А-Б» №2 при отключении «А-Б» №1 ток равен 313 А, что составляет 51,8%. Исходя из этих данных можно сделать вывод, что при использовании «Ситикабеля» незначительно увеличится пропускная способность линии 110 кВ «А-Б» №1,2. В связи с тем, что допустимый ток для кабеля типа «Ситикабель» сечением 630 мм², выполненный из меди, равняется 624 А, что дает прирост пропускной способности на 3,2%.

3. АНАЛИЗ РЫНКА КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

3.1 ПАРАМЕТРЫ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

3.1.1 Развитие кабельной индустрии

С момента использования первого изделия, которое можно назвать кабелем, прошло более двухсот лет. Шиллинг Павел Львович, русский ученый и изобретатель, в 1812 г. решил использовать электрические провода с гуттаперчевой изоляцией для подрыва мин на дне реки Невы. В 1816 г. в Англии проложили кабельную линию на глубине приблизительно 1 м. Она представляла собой 5 медных проводников в трубках, которые были уложены в деревянные желоба, обернутые кошмой. Уже в 1840 г. изобрели пресс, который мог непрерывно накладывать на проводник резиновую изоляцию. В 1856 г. была проложена телеграфная подводная кабельная линия связи через Атлантический океан. Ее длина достигала 5000 м, глубина прокладки до 5 км, но, к сожалению, она не работала, и ее пришлось забросить. В дальнейшем кабельная промышленность получила большой толчок после изобретений свинцовой герметизирующей оболочки в 1878 г, а уже в 1879 г. был изобретен пресс для непрерывного покрытия кабеля данной оболочкой. Благодаря этому в 1884 г. был создан кабель на напряжение 2 кВ с пропитанной джутовой изоляцией и свинцовой оболочкой. Благодаря изобретению в 1885 г. ленточной брони кабель можно было укладывать непосредственно в грунт, так как это позволило защитить его от механических повреждений. При помощи изобретений бумажной изоляции в 1889-1890 гг. удалось повысить рабочее напряжение с 2 до 10 кВ.

Первая успешно смонтированная кабельная линия появилась в 1891 г. в Англии. Она была произведена фирмой Ферранти. Рабочее напряжение линии 10 кВ, длина 48 км, однако, строительная длина кабеля была всего лишь 6 м. Для его монтажа понадобилось приблизительно 8 тысяч соединительных муфт, что в свою очередь создало немалые трудности при монтаже.

Постепенно требовалось передавать большие мощности, что неизменно повлекло за собой увеличение рабочего напряжения. Благодаря этому в 1912 г. в Баку появились трехжильные кабели с поясной изоляцией на 20 кВ, которые эксплуатировались даже после 1990 г., что в свою очередь говорит о высоком качестве изделия. В 1910 г. был

изготовлен трехжильный кабель с поясной изоляцией на напряжение 30 кВ, а уже в 1911 г. был разработан одножильный кабель на напряжение 60 кВ.

Для дальнейшего увеличения пропускной способности линий требовались новые технологии. В 1918 г. итальянский инженер Л. Эмануэли предложил использовать маслонаполненные кабели, которые соединены со специальными маслоподпитывающими устройствами. Токопроводящая жила имела внутри себя канал, который заполнялся маслом. Благодаря использованию маловязкого масла в изоляции было полностью исключено появление воздушных включений, практически в 2 раза была увеличена рабочая напряженность, а так же увеличена рабочая температура. Данные кабели успешно прошли испытания и уже в 1923 г. была сооружена опытная линия длиной 600 м и рабочим напряжением 130 кВ. В 1932 г. было начато производство маслонаполненного кабеля высокого давления, который располагался в трубе. Данный кабель имеет высокую механическую прочность благодаря стальной трубе, которая надежно защищает кабель от повреждений в грунте.

Долгое время именно бумажная пропитанная изоляция являлась основным видом изоляции для высоковольтных кабелей. Но приблизительно в 70-е г. прошлого века промышленностью был освоен новый тип изоляции кабелей — сшитый полиэтилен (СПЭ изоляция). Данный тип изоляции используется и по настоящее время и постоянно совершенствуется. Но, как и у любого изделия, у данного типа изоляции есть свои плюсы и минусы, о которых и сейчас спорят ученые со всего мира.

3.1.2 Анализ структуры развития кабельной индустрии в России

Первый кабельный завод, появившийся в Российской империи, был открыт немецким инженером, основавшим компанию «Siemens», Вернером фон Сименсом. В 1879 г. ему было выдано свидетельство на работу в возведенном им заводе по производству изолированной проволоки и телеграфных кабелей в городе Санкт-Петербурге. В дальнейшем этот завод будет называться «Севкабель» и сыграет огромную роль в становлении кабельной промышленности страны. В 1900 г. организовали производство на Кольчугинском латунном и меднопрокатном заводе, который стал производить различные кабели и провода, в том числе и силовые кабели с резиновой изоляцией. В настоящее время данный завод называется «Электрокабель» и является одним из ведущих кабельных заводов России. В 1885 г. был основан московский завод

«Москабель» (в настоящее время «Москабельмет»). Его основателем был выдающийся инженер-технолог М. М. Победов, который желал создать базу для отечественной кабельной промышленности независимо от иностранного капитала. Его завод уже в то время выпускал широкий спектр кабельной продукции с различными видами изоляции. К 1916 г. в Российской империи существовало четыре кабельных завода, которые успешно выполняли промышленные и военные заказы.

Дальнейшее развитие отрасли получила уже в годы становления советской власти. Так в 20-х г. прошлого века был принят и начат реализовываться план по электрификации страны, более известны как ГОЭЛРО. В это же время инженерами завода «Севкабель» С. М. Брагиным и С. А. Яковлевым был разработан трехжильный кабель с радиальным электрическим полем, более известный как кабель с отдельно освинцованными жилами в бумажной изоляции. Данные кабели успешно эксплуатировались при напряжении 20-35 кВ переменного тока, так как тангенциальная составляющая электрического поля в изоляции кабелей практически отсутствует. Позднее завод разработал первый в СССР маслонаполненный кабель на 110 кВ, следом газонаполненный кабель. «Севкабель» является пионером в разработке эмалированных проводов.

После Великой Отечественной войны в Москве на базе центральной кабельной лаборатории завода «Москабель» был создан научно-технический центр ВНИИКП (сейчас ОАО «ВНИИКП»), который возник из научного подразделения Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ). Этот исследовательский институт нужен был для того, чтобы решать новые технические задачи для создания кабелей, предназначенных для различных отраслей промышленности. В дальнейшем были открыты филиалы ВНИИКП в городах: Томск, Ташкент, Ленинград, Бердянск. Так же появилось особое конструкторское бюро кабельной промышленности (ОКБ КП) в Мытищах, оно специализировалось на продукции оборонного назначения.

Благодаря данным исследовательским институтам было создано и внедрено на кабельные заводы множество разработок таких как:

1. маслонаполненные кабели высокого давления напряжением 110-500 кВ;
2. силовые кабели с СПЭ изоляцией напряжением 110 кВ и выше;
3. широкий спектр сталеалюминевых проводов для воздушных ЛЭП сверхвысокого напряжения;
4. кабели и провода для нефтегазовой отрасли;

5. радиочастотные кабели различных типов, волноводы;
6. провода для обмоток электрических машин;
7. кабели с резиновой изоляцией для шахт, судостроения и т. д.

Первые образцы кабелей с пластмассовой изоляцией начали разрабатывать в 60-х г. прошлого века. Промышленный выпуск кабелей напряжением 1 кВ был налажен к началу 70-х г. В 1984 г. появился опытный образец кабеля на 35 кВ с пластмассовой изоляцией, он был предназначен для нефтебуровых вышек. Аналогичный кабель был проложен в Санкт-Петербурге.

Кабельная промышленность СССР к 1990 г. занимала второе место в мире по производству кабельных изделий. К 1998 г. объем выпуска составлял всего 25 % от уровня производства 1990 г, в связи с экономическим кризисом. В начале 2000-х г. кабельная промышленность начала возрождаться и увеличился объем выпущенной продукции, ряд кабельных заводов реализовал крупные инвестиционные программы. Одним из факторов, позволившим сохранить данную отрасль послужило объединение производителей в ассоциацию «Электрокабель», а так же наличие научно-технического центра — ОАО ВНИИКП. В 2003 г. был основан самостоятельный выпуск кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ, а уже в 2006 г. начато производство силовых кабелей с СПЭ изоляцией на напряжение 110 кВ на заводе «Севкабель».

В настоящее время кабельная промышленность России не стоит на месте, так как требуется постоянное совершенствование конструкций кабелей. Это обусловлено не только новыми требованиями заказчиков и нормативных документов, но и высокой конкуренцией на рынке кабельных изделий. Но, в связи с тем, что данный рынок достаточно консервативен, новые разработки не всегда удается сразу продвинуть в массовое производство. Это связано с тем, что инвесторы не хотят вкладывать ресурсы в новое производство, так как неясно как отреагирует рынок. Так же тратится большое количество времени и денег на испытания новых разработок, так как эксплуатирующие организации так же не будут внедрять все, что им предлагают кабельные заводы без соответствующих документов, подтверждающих качество изделия. Вероятнее всего, пройдут годы, прежде чем новые разработки будут использоваться повсеместно.

Исходя из всего вышесказанного прекрасно видно, что отечественная кабельная промышленность существует достаточно долгое время наравне с зарубежными фирмами. Немаловажную роль сыграло принятие и реализация плана ГОЭЛРО, благодаря которому

была проведена широкомасштабная электрификация всей страны. Кабельные заводы развивались усиленными темпами, разрабатывались новые изоляционные материалы, а так же способы их наложения на жилы кабелей, появлялось различное новое оборудование, благодаря которому повышалась надежность, качество изделий. Постоянные соцсоревнования, в свою очередь, помогали повысить темпы и культуру производства. Планы выполнялись, а зачастую и перевыполнялись. Благодаря этому страна полностью покрыла потребность в качественных кабелях, проводах, шнурах для электрификации различных отраслей промышленности.

В 90-х г. прошлого века многие отрасли пришли в упадок из-за отсутствия финансирования, в том числе и производство кабельно-проводниковой продукции. Большая часть кабелей для промышленных нужд закупалась за рубежом. Как правило, закупки были в Китае, США и некоторых странах Европы.

В настоящее время благодаря политике импортозамещения кабельная продукция отечественных производителей начинает постепенно вытеснять иностранные образцы, так как по качеству они не отстают, а иногда и превосходят изделия иностранного производства. Разработки новых типов кабелей и изоляционных материалов продолжаются, потому что в условиях рыночной экономики тяжело удержать в данном секторе рынка только за счет классических изделий.

3.2 МАСЛОНАПОЛЕННЫЕ КАБЕЛИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

3.2.1 Область применения

Данный тип кабеля получил свое распространение для вывода мощности от энергоблоков ГЭС (на напряжении 110-220 кВ и приблизительной мощности 300-400 МВА, а так же при напряжении 330 кВ) к ОРУ или переходным пунктам. Применяется для прокладки в труднопроходимых местах, при высокой плотности застройки, большой загрязненностью окружающей среды, пересечение с водными преградами, глубокие вводы электроэнергии в города, питание энергоемких промышленных предприятий, непосредственный ввод в цеха для питания мощных агрегатов от трансформаторов с кабельными вводами и так далее. Длина кабельной линии, выполненной маслонаполненным кабелем высокого давления, обычно, составляет от 3 до 15 км.

3.2.2 Конструкция кабеля и его характеристики

Токопроводящая жила кабеля представляет собой скрученные круглые нелуженые медные проволоки $\varnothing=2-3$ мм. При изготовлении жилы диаметром от 1000 мм² и более проволока скручивается в 4 сектора изолированных друг от друга полупроводниковой бумагой. Это обеспечивает уменьшение сопротивления жилы переменному току, так как снижается влияние поверхностного эффекта и эффекта близости.

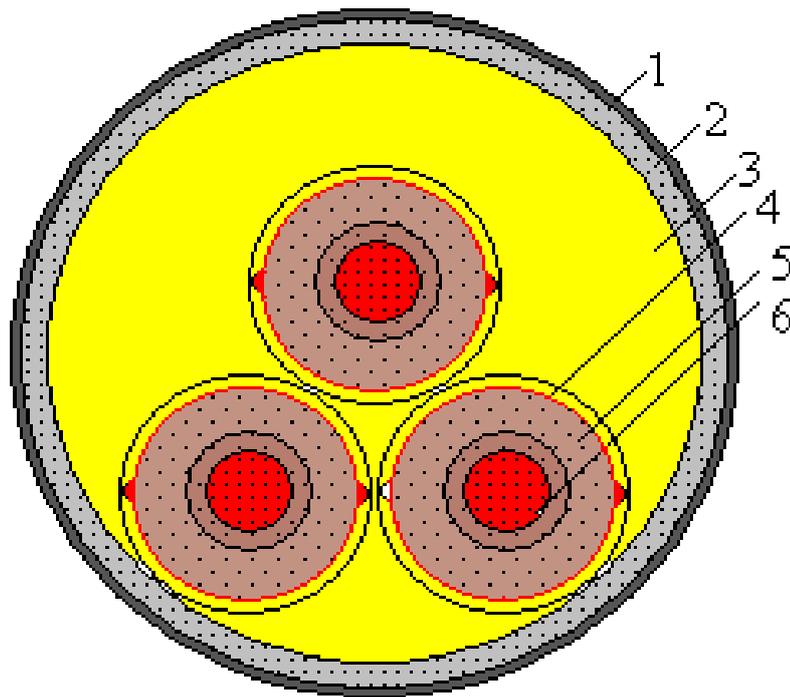


Рис. 3.1 — Поперечный разрез масляного кабеля высокого давления

1 — антикоррозионный покров; 2 — стальная труба; 3 — масло; 4 — экран из медных перфорированных лент и проволоки скольжения; 5 — бумажная изоляция, пропитанная маслом; 6 — токопроводящая жила.

Изоляция выполняется градирующей, то есть изготавливается из бумаги с различной толщиной и плотностью. Для этого применяются кабельная бумага различной толщины 0,08 и 0,12 мм для 110 кВ, а для 220 кВ и выше 0,08, 0,12, 0,17. Бумажные ленты наматываются на жилу и пропитываются маслом. Первый слой изоляции выполняется из бумаги толщиной 0,08 мм, так как она обладает большей электрической прочностью, так же это позволяет уменьшить толщину масляной прослойки и это, в свою очередь, повышает электрическую прочность кабеля. Бумажные ленты укладываются с зазором 0,5-2,00 мм для того, чтобы при изгибе кабеля они могли смещаться без разрыва и замятия краев. Каждый слой ленты перекрывает зазор предыдущей на 1/3 своей ширины.

Толщина изоляции вычисляется исходя из напряжения переменного тока частотой 50 Гц и импульсному напряжению. Исходя из расчетов выбирается наибольшая толщина изоляции. Для кабелей напряжением 110-220 кВ максимальная напряженность электрического поля равна 8,0-9,0 МВ/м, а для кабелей напряжением 500 кВ — не более 15 МВ/м. Максимальная напряженность по импульсному напряжению принимается равной не более 100 МВ/м.

Сверху изоляции жилы накладывается экран, который сглаживает неровности на ее поверхности, а также выполняет функцию формирования радиального электрического поля в толщине изоляции. Экран, который накладывается на изоляцию, сглаживает неровности с внутренней поверхности медных лент и не позволяет образоваться масляным полостям между ними и поверхностью изоляции. Поверх экрана накладывается не менее 2-х проволок скольжения из немагнитного материала (например: луженая медь) размером 2,5x5,0 мм, которые предотвращают повреждение кабеля при его затяжке в трубу. Так же проволоки образуют между фазами зазор, при помощи которого обеспечивается лучшее охлаждение, так как масло может свободно циркулировать между кабелями разных фаз. Поперечный разрез кабеля в трубе представлен на рисунке 3.1.

Для того чтобы защитить кабель при его транспортировке и хранении поверх проволок скольжения накладывается временная свинцовая оболочка, которая срезается и стягивается специальной машиной при непосредственном затягивании кабеля в трубу. Для безопасного хранения, транспортировки и прокладки кабеля он наматывается на барабан и упаковывается в специальный контейнер (Рис. 3.2).

Когда накладывается бумажная изоляция, то изолированная жила сразу подается на барабан, а он в свою очередь устанавливается в контейнер. В нем же проводят сушку, пропитку, сдаточные испытания, транспортировку и хранение кабеля. Для того чтобы обеспечивать неизменные электрические характеристики в контейнере есть компенсатор, который поддерживает постоянное избыточное давление масла в изоляции при изменении температуры окружающей среды. Перед затяжкой в трубопровод, контейнер соединяют с трубопроводом при помощи закрытых шлюзов и через них тянут кабель. На барабан можно намотать 600-800 м кабеля 110-220 кВ. Так же можно увеличить строительную длину в 2 раза при применении специальных корзин.

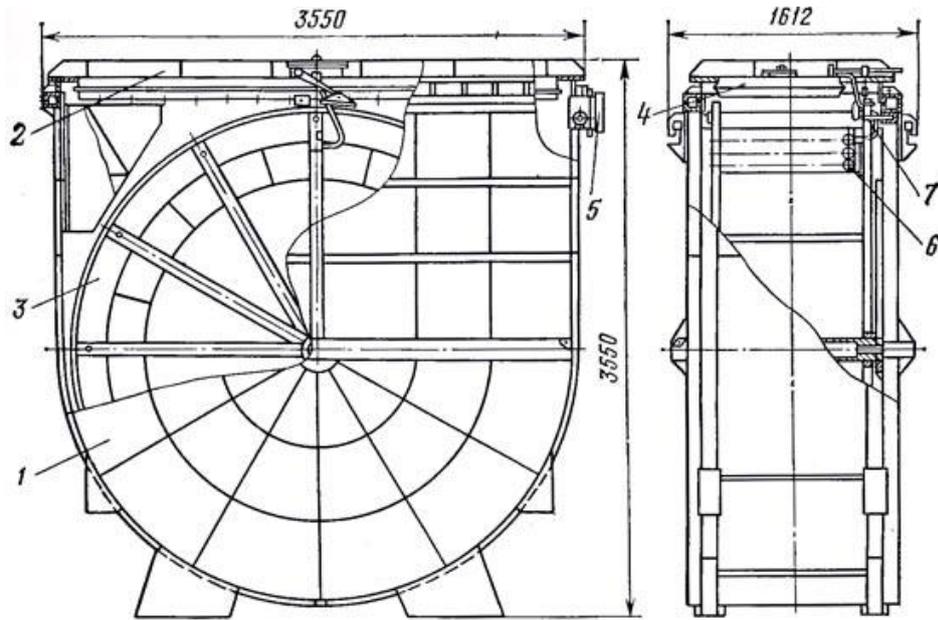


Рис. 3.2 — Контейнер для кабеля высокого давления без свинцовой оболочки.

1 — корпус контейнера; 2 — крышка контейнера; 3 — барабан с кабелем; 4 — компенсатор; 5 — люк для разматывания кабеля; 6 — кабель; 7 — стопор барабана.

Все параметры кабелей регламентируются ГОСТ 16441-78 «Кабели маслонаполненные на переменное напряжение 110-500 кВ». Согласно данному нормативному документу сопротивление кабеля должно быть не более 0,01790 Ом при пересчете на 1 мм² сечения, 1 метра длины и номинальной температуре 20° С. Фактическое же сопротивление строительных длин кабеля получается в диапазоне 0,01583-0,01770 Ом. Перед отгрузкой на месте монтажа кабель подвергается контрольным электрическим испытаниям. Он должен выдержать испытание переменным напряжением частотой 50 Гц в течение 15 минут: 110 кВ — испытательное напряжение $0,9U_0$; 220 кВ — $0,7U_0$; 330 кВ — $0,65U_0$; 500 кВ — $0,5U_0$,

где U_0 — переменное напряжение частотой 50 Гц между жилой и оболочкой кабеля при номинальном междуфазном напряжении. Также нормируется тангенс угла диэлектрических потерь, который является показателем качества изоляции.

3.2.3 Прокладка кабеля

Кабель может прокладываться в траншее или кабельном сооружении (туннель, коллектор). Прокладка в траншее осуществляется ниже уровня промерзания грунта и на глубине не менее 1,5 м. При такой глубине все коммуникации (кабели, трубы и т. д.) будут находиться выше уровня кабеля и, когда будет осуществляться их ремонт, земляные работы не будут проводиться на уровне прокладки маслонаполненной линии. Так же немаловажным положительным фактором является то, что при такой глубине прокладки улучшаются условия подпитки маслом. Это связано с тем, что масло С-220 при температуре ниже 0°С обладает большой вязкостью и его проникновение в изоляцию затруднено. При выборе способа прокладки кабельной линии руководствуются ее назначением. Например: при строительстве глубоких вводов в города применяют траншейный способ, для передачи мощности от энергоблоков ГЭС строят туннели, от ГЭС с ОРУ прокладывают траншею (если нет специальных требований). В туннелях возможны 2 варианта крепления кабельной линии: первый — укладка труб на специальных кронштейнах, второй — при помощи специальных подвесов к потолку туннеля (Рис. 3.3).

Сооружать маслонаполненные кабельные линии высокого давления имеют право только специализированные монтажные организации. Они должны иметь специальное оборудование, приспособления, инструменты и материалы, а так же специалистов высокой квалификации, которые прошли обучение на одном из заводов-изготовителей кабеля и постоянно занимающиеся монтажом маслонаполненных кабелей. Работы могут проводиться только при наличии проекта производства работ, который согласовывает завод-изготовитель. Для начала по всей длине трассы прокладывается стальной трубопровод, секции которого свариваются между собой. Одновременно с этим в трубопровод затягивается стальной трос или проволока для затяжки вспомогательного троса перед монтажом. Если данная операция была не выполнена, то возможна протяжка при помощи тампона и сжатого воздуха. Вспомогательный трос предназначен для очистки трубопровода изнутри. Следом проводят комплекс мероприятий для подготовки протягивания кабеля в трубопровод. Снимают обшивку барабанов для проведения визуального осмотра. Проводится проверка правильной синхронной и раздельной работы машин для снятия свинцовой оболочки и лебедки для тяжения. Производится подготовка вакуумных насосов и сливных баков для вакуумирования трубопровода с кабелями.

Все последующие работы должны проводиться непрерывно, начиная со снятия свинцовой оболочки и заканчивая началом вакуумирования. Концы кабеля зачищаются от свинцовой оболочки, производится монтаж захватов. Каждый из трех захватов при помощи тросов состыковывается с приспособлением против закручивания, которое соединяется с тросом тяговой лебедки. Длины тросов должны отставать друг от друга на 0,5 — 1 м. На входе в трубу устанавливаются ролики так, чтобы кабели не касались стенок трубы и все три фазы были расположены треугольником с основанием в горизонтальной плоскости. Далее проводится затяжка всей плети в трубопровод. Если одновременно производится снятие свинцовой оболочки и протяжка, то скорость прокладки 1 — 1,5 м/мин. Если оболочка была снята заранее полостью, то скорость можно увеличить до 3 — 8 м/мин. Усилие тяжения не должно превышать 5 кгс/мм² ($9,8 \cdot 10^6$ Па). Усилие тяжения записывается устройством регистрации тяжения, если усилие превышает допустимую величину, то лебедка автоматически выключается.

После того как будет завершен монтаж всех элементов кабельной линии, проводится вакуумирование и заполнение маслом трубопровода. Если линия большая по протяженности, то вакуумирование и заполнение маслом проводится поочередно на участках от 1 до 3 км. Для соединения отдельных частей кабеля масло замораживают в трубопроводе. До начала процесса вакуумирования должны быть полностью смонтированы коллекторы системы маслоподпитки. Так же должна быть смонтирована, проверена на герметичность и подсоединена к коллектору автоматическая подпитывающая установка. Отдельно проводится проверка вакуумных установок на герметичность, остаточное давление при работающих вакуумных насосах не должно превышать $0,0133 \cdot 10^{-3}$ МПа (0,1 мм рт.ст.) и натекание составляет не более $0,02 \cdot 10^{-3}$ МПа (0,15 мм рт.ст.), только после этого проводят вакуумирование самой кабельной линии. После того как в кабельной линии в течение 24 ч установившееся остаточное давление не поднимается выше $0,133 \cdot 10^{-3}$ МПа (1,0 мм рт.ст.), производят испытание на «натекание», вакуумные насосы отключаются и если спустя 2 ч остаточное давление по всем приборам учета увеличится не более чем на $0,133 \cdot 10^{-3}$ МПа (1,0 мм рт.ст.), то требуемая герметичность соблюдена. Если норма превышена, то производится поиск места разгерметизации, его устранение и повторные испытания. Время общего вакуумирования до установления остаточного давления $0,133 \cdot 10^{-3}$ МПа должно быть не менее 48 ч.

После вакуумирования кабельная линия заполняется маслом от дегазационной установки, при помощи которой создается давление 0,098 — 0,196 МПа. Проводятся пробы масла, если они удовлетворительны, то дегазационная установка отсоединяется. От

подпитывающего устройства в линии повышается давление до 1,47 — 1,57 МПа, при таком давлении линия выдерживается до 3-х суток. После этого проверяется качество сварных швов и устранение течей, если таковые имеются. Спустя 5 суток проводят пробы масла.

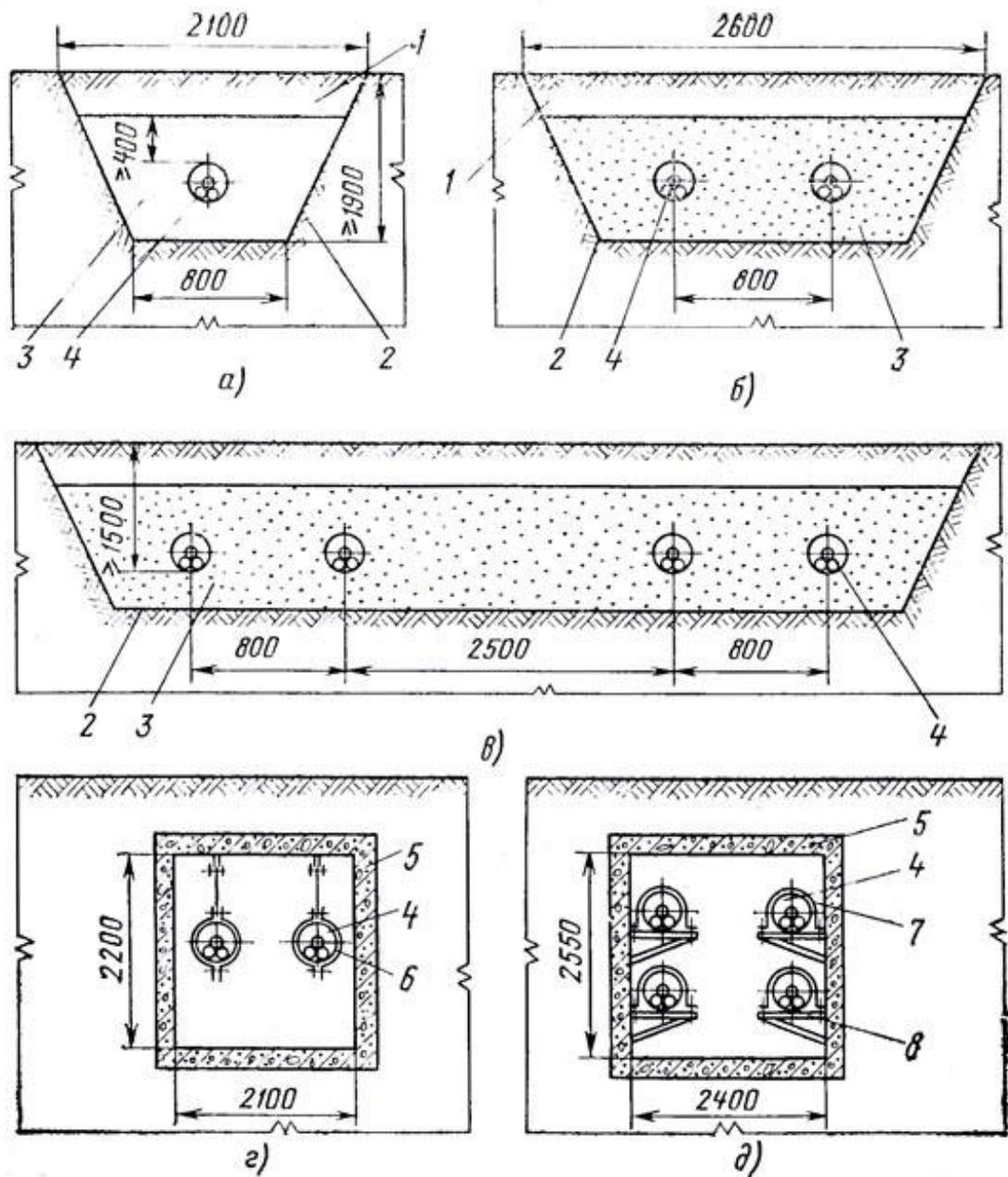


Рис. 3.3 — Способы прокладки маслонаполненных кабелей высокого давления

а — одноцепная линия в траншее; б — двухцепная линия в траншее; в — четырехцепная линия в траншее; г — в туннеле на подвесках; д — в туннеле на кронштейнах; 1 — грунт для засыпки траншеи; 2 — кабельная траншея; 3 — специальный засыпочный грунт с

улучшенными тепловыми свойствами; 4 — трубопровод с кабелями; 5 — туннель для кабельной линии; 6 — подвеска трубопровода с кабелями; 7 — скоба для крепления трубопровода на кронштейне; 8 — кронштейн.

Для поддержания рабочего давления в линии применяются автоматические подпитывающие устройства (АПУ). Данные установки размещаются в закрытых помещениях с температурой воздуха не ниже $+10^{\circ}\text{C}$, они, как правило, состоят из двух устройств, которые разделяются несгораемой перегородкой и должны быть расположены как можно ближе к кабельной линии. Маслопровод до линии должен быть проложен или в помещении с плюсовой температурой или в траншее при том же условии. АПУ должны быть оборудованы связью с диспетчерским пунктом, пожарной сигнализацией или устройствами автоматического пожаротушения. Серийные АПУ поддерживают давление в диапазоне $(1,37\pm 0,196)$ МПа. Это осуществляется при помощи баков, входящих в состав АПУ. При охлаждении линии масло поступает из бака в трубопровод, а при нагревании наоборот, поднимается в бак, количество баков определяется расчетом. Давление масла постоянно контролируется и записывается, в результате получается суточная диаграмма давления масла, таким образом можно определить график работы кабельной линии и режим.

Для защиты от коррозии трубопровод линии высокого давления имеет усиленную защиту, независимо от коррозионной активности грунта. Данные защитные покрытия наносятся на заводе-изготовителе труб. Непосредственно на месте монтажа покрываются изоляцией только места сварки труб и корпуса соединительных муфт. В качестве защитного покрова применяется катодная поляризация, при которой на трубопроводе поддерживается отрицательный потенциал.

3.2.4 Сдача и эксплуатация кабельной линии высокого давления

После окончания всех монтажных работ и заливки масла проводятся приемо-сдаточные испытания:

1. испытание повышенным напряжением выпрямленным током;
2. измерение активного сопротивления жил кабеля;
3. измерение емкостей фаз;

4. измерение сопротивления заземления концевых муфт;
5. проверка фазировки линии;
6. измерение коррозионных потенциалов трубопровода;
7. измерение токов утечки через антикоррозионную изоляцию;
8. измерение сопротивления изоляции мегаомметром;
9. определение характеристик масла.

Для линий напряжением 110 кВ испытательное напряжение равно 250 кВ; для 220 кВ — 450 кВ; для 330 кВ — 670 кВ; для 500 кВ — 865 кВ. Испытательное напряжение прикладывается в течение 15 минут. Если не произошло пробоя изоляции, отсутствовали скользящие разряды по поверхности изоляторов у концевых муфт, ток утечки не возрастал или отсутствовал толчок тока утечки после достижения установившегося режима, то считается, что кабельная линия выдержала испытания повышенным напряжением. Так же по согласованию с заводом-изготовителем вместо испытания выпрямленным напряжением возможно проведение испытаний переменным напряжением промышленной частоты $f=50$ Гц $(1,0-1,73)U_0$. Время испытания нормируется по согласованию с заводом-изготовителем;

Если все параметры находятся в норме, то линия считается сданной в эксплуатацию и последующие наблюдения должна осуществлять организация, эксплуатирующая данную линию.

Во время эксплуатации кабельной линии высокого давления проводится осмотр трассы, измерение различных параметров, ремонтные и профилактические работы, выполняемые в соответствии с планом-графиком эксплуатационных работ. Для предотвращения аварийных ситуаций проводятся периодические осмотры кабельной линии в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей», периодичность осмотра представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Периодичность осмотра трассы КЛ и сооружений КЛ с МНК

Место прокладки кабеля / сооружения КЛ	Периодичность осмотра
Кабельная линия, проложенная в земле	не реже 1 раза в месяц
То же в коллекторах и тоннелях	не реже 1 раза в 3 месяца
Кабельные муфты	не реже 1 раза в 3 месяца
Кабельные колодцы	не реже 1 раза в 3 месяца

Кабельные линии, проложенные в грунте, осматриваются чаще всего потому, что они больше всего подвержены повреждению, если на поверхности ведутся какие либо несанкционированные работы.

Для контроля состояния кабельной линии регулярно берутся пробы масла, которые отбираются из различных элементов линии. Контролируется электрическая прочность масла, тангенс угла диэлектрических потерь, наличие водорастворимых кислот, газовых включений и процентное отношение содержащихся газов. Для определения количества газов в масле применяется хроматографический метод. Контролю масла уделяется большое значение, потому что по его состоянию можно оценить надежность линии в целом. Например, при увеличении диэлектрических потерь в масле (это происходит в связи со старением) ухудшаются электрические характеристики всей бумажно-масляной изоляции. Забор масла проводится через год после включения линии, потом через 3 года, последующие отборы проб раз в 6 лет из концевых, разветвительных, полустопорных муфт и подпитывающей установки. Если отклонение от предыдущего результата более 30%, то промежуток между заборами проб сокращается.

Для нормальной работы линии эксплуатирующая организация должна иметь запас масла для пополнения. Запас должен составлять не менее 5% от общего объема масла находящегося в линии. Масло добавляется в линию после ремонтных работ или отбора проб. Так же в масляном хозяйстве должна быть установка для отчистки масла, особенно если у эксплуатирующей организации есть несколько кабельных линий высокого давления. Благодаря данной установке слитое после ремонта грязное масло можно очистить и заново использовать, что снижает затраты на покупку дополнительного количества масла.

Одной из наиболее распространенных поломок кабельных линий высокого давления является течь масла. В основном они происходят в местах уплотнения арматуры и у маслоподпитывающих устройств, реже в стальном трубопроводе. Для обнаружения течи проверяют диаграммы, на которых записаны показания манометров и при помощи контролирования уровня масла в баке-хранилище. Иногда к АПУ подключено несколько линий, тогда для определения поврежденной линии перекрываются все клапаны подачи масла и по показаниям манометров на каждой линии проверяется падение давления. Если в линии наблюдается постоянное снижение давления, то она повреждена. В исправных линиях давление будет медленно подниматься или немного снижаться это зависит от теплового состояния.

При электрическом пробое изоляции кабеля для определения места повреждения используется акустический метод, который позволяет определить место повреждения с точностью до нескольких сантиметров. При приваривании жилы к трубе место повреждения можно определить с помощью источника постоянного тока и вольтметра. Для заморозки трубопровода до места повреждения можно использовать сухой лед и ацетон в специальной муфте (если кабельная линия заполнена маслом С-220 или идентичным по характеристикам) или жидким азотом (если для заполнения трубопровода было применено масло МН-4). Траншея вскрывается и разрезается трубопровод. Далее принимается решение о замене всей строительной длины или только поврежденного участка. Это зависит от причин и тяжести повреждений. Если заменяется часть кабеля, то поврежденный участок вырезается и проводится измерение $\text{tg}\delta$ отдельных слоев бумажной изоляции. Если $\text{tg}\delta$ не удовлетворяет норме, то куски кабеля вырезаются до тех пор, пока величина $\text{tg}\delta$ не будет превышать нормированного значения. Необходимая длина кабеля восстанавливается за счет нового кабеля и проводится очистка трубопровода от продуктов горения (сажи и копоти) при помощи тампонирования. Для проверки отсутствия газов вследствие короткого замыкания и их удаления устанавливаются ниппели, при помощи которых происходит откачка газа до полного исчезновения пузырьков в масле, которые видно через стеклянную трубку. Полезным будет проверка масла на хроматографе для исключения нахождения в масле опасных примесей. После восстановления кабельной линии и герметичности трубопровода заморозка снимается, линия заполняется маслом и подается напряжение. Длительность такого ремонта может варьироваться от 14 до 16 суток.

3.3 КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ТИПА CityCable («Ситикабель»)

3.3.1 Область применения

Данный тип кабеля применяется для замены маслonaполненных линий высокого давления, а так же для обычной прокладки. Используется на напряжение 110 — 220 кВ для передачи мощности от электрических станций к распределительным пунктам, подстанциям, транспортировка электрической энергии в городах в условиях плотной застройки. Прокладка кабельной линии в условиях сильной разницы высот, применение бестраншейных способов прокладки, таких как: горизонтально-направленное бурение и

вибропогружение. Прокладка в агрессивных, влажных и загрязненных грунтах. Длина кабельной линии не ограничена.

Разработка данного кабеля велась с начала 2000-х г. инженерами немецкой фирмы NKT cables. Всего было разработано 3 типа кабелей. Первый тип кабеля был разработан для прокладки в металлической трубе при замене маслonaполненной линии высокого давления, а так же для прокладки новых линий. Второе поколение кабелей предназначено для протяжки в пластиковых трубах, но не исключает применения в стальных трубах. Третье поколение предназначено для прокладки в любых типах труб и оборудовано магнитным экраном, который предназначен для снижения электромагнитного воздействия на электротехнические устройства находящиеся в непосредственной близости от кабельной линии.

Данный тип кабеля был применен на различных энергетических объектах в Европе. Например, при замене газонаполненного кабеля в Амстердаме на напряжении 150 кВ. Благодаря этому удалось увеличить пропускную способность линии. Так же была произведена замена маслonaполненного кабеля высокого давления в густонаселенном районе Парижа, благодаря применению CityCables земляные работы не проводились. В России так же реализован ряд объектов с использованием данного кабеля в крупных городах таких, как Москва и Санкт-Петербург. В Москве проведено несколько успешных реконструкций, например, замена КЛ «ГЭС 1 — филиал ГЭС 1», которая проходит под Софийской набережной. Во время ведения работ не производилось рытье грунта, разбора набережной и проезжей части, что позволило уменьшить затраты по деньгам и времени. Так же была реконструирована линия 110 кВ «ПС Чоботы — ПС Полет 1,2» с выдачей мощности в аэропорт Внуково. В Санкт-Петербурге применили при реконструкции 220 кВ ПС «Чесменская». Во всех случаях удалось увеличить пропускную способность линии, а так же снизить затраты и время на возведение линий.

3.3.2 Конструкция и характеристики CityCable

Так как полиэтилен обладает хорошими электрическими, физическими и технологическими характеристиками его стали применять для изоляции кабелей. В связи с тем, что в кабелях, зачастую, бывают высокие нагрузки, обычный термопластичный полиэтилен не справляется со своей задачей. При температурных воздействиях (около 85° С) проявляется эффект ползучести и резкое ухудшение механических характеристик, в

плоть до полного изменения формы (стекание с проводника). Для устранения этих недостатков применяется сшитый полиэтилен, который позволяет улучшить электрические, механические параметры, так же имеет малую гигроскопичность. Сшитый полиэтилен не теряет своих характеристик даже при температуре в 130° С. Под термином «сшивка» подразумевается изменение молекулярной структуры полиэтилена. При этом поперечные связи, созданные при сшивании между молекулами, создают новую трехмерную структуру, благодаря которой проявляются высокие электрические и механические свойства материала, а так же увеличивается рабочий диапазон температур.

Существует четыре способа сшивания полиэтилена:

1. Пероксидная сшивка. Данный вид сшивания получил широкое распространение благодаря тому, что есть возможность производить кабели, как среднего, так и высокого напряжений на линиях газовой вулканизации. Сшивка проводится при помощи специальных химических веществ — пероксидов в среде нейтрального газа при определенной температуре и давлении. В качестве реактива, как правило, идет перекись водорода при температуре около 200° С. Это позволяет получить высокую степень сшивки (до 85 %) на всей толщине изоляции и исключить газовые включения. Главным недостатком такого метода является его высокая точность, даже незначительное отклонение в технологическом процессе может привести к потере некоторых свойств изоляции или к полному браку в кабеле. Так же этот метод является дорогим.
2. Силановая сшивка. Данный тип сшивки получил распространение для кабелей среднего напряжения. Для сшивания применяются специальные вещества — силаны. Соединение молекул происходит в твердой фазе и при гораздо меньшей температуре, чем пероксидная. Степень сшивки получается в районе 65-70 %, что является достаточным показателем для кабелей среднего напряжения. Данный метод является высокопроизводительным и экономичным.
3. Радиационная сшивка. Сшивка проводится при помощи перемещения полиэтилена через ускоритель электронов, в котором на него воздействует либо рентгеновское или гамма излучения. В реакцию вступают одноименные свободные атомы и степень сшивки получается порядка 60 %. Данный метод не требует добавления каких либо веществ, проходит в твердой фазе, максимальная степень сшивки определяется дозой облучения. Метод не применяется, так как изделия имеют радиоактивный фон, что может стать причиной ухудшения здоровья людей и негативно сказаться на экологии в целом.

4. Азотная сшивка. Сшивание проводится при помощи радикалов азота. Характеризуется высокой степенью сшивки до 70 %. Данный метод не получил распространения, так как требует большого количества времени и жестких условий для протекания реакции.

В российской технической литературе кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют обозначение СПЭ, в английской — XPLE, в немецкой — VPE, в шведской PEX. Кабель состоит из алюминиевой или медной многопроволочной жилы круглого сечения. Поверх жилы накладывается полупроводящий слой для сглаживания неровностей жилы и тем самым исключается возникновение повышенной напряженности у поверхности отдельных проволок. Следом идет изоляция из сшитого полиэтилена, толщина которой зависит от класса напряжения, которая покрывается полупроводящим экраном и влагопоглощающей лентой. Далее идет оболочка, которая состоит из ленты с алюминиевым покрытием и полиэтиленовая оболочка. Три кабеля укладываются в треугольник с основанием в горизонтальной плоскости, они обвязываются специальной подложкой, которая покрывается броней из плоских металлических проволок. При изготовлении возможно размещение внутри конструкции кабеля волоконно-оптической линии связи (Рис. 3.4). Вся конструкция наматывается на барабан, строительная длина кабеля может достигать 800 м, в зависимости от сечения. Доступные сечения на напряжение 110 кВ варьируются от 150 до 1400 мм².

У данного типа кабеля выше пропускная способность линии при том же сечении жилы, так как СПЭ изоляция позволяет выдерживать более высокую длительно допустимую температуру (90° С при использовании сшитого полиэтилена против 70° С при использовании БМИ). За счет повышенной длительно допустимой температуры увеличивается термическая стойкость кабеля во время короткого замыкания. СПЭ изоляция обладает более низким тангенсом угла диэлектрических потерь, что существенно снижает потери в изоляции (для СПЭ изоляции $\text{tg}\delta=(1,5-2)\cdot 10^{-5}$, для БМИ $\text{tg}\delta=(3-5)\cdot 10^{-3}$). CityCable более экологичен, так как в нем отсутствует масло, которое может вытекать и загрязнять окружающую среду. Отсутствуют ограничения по перепадам высот на кабельной трассе. Благодаря отсутствию масляного наполнения монтаж упрощается и удешевляется. Так же нет необходимости проводить обслуживание данного типа кабеля, так как отсутствует маслоподпитывающая аппаратура.

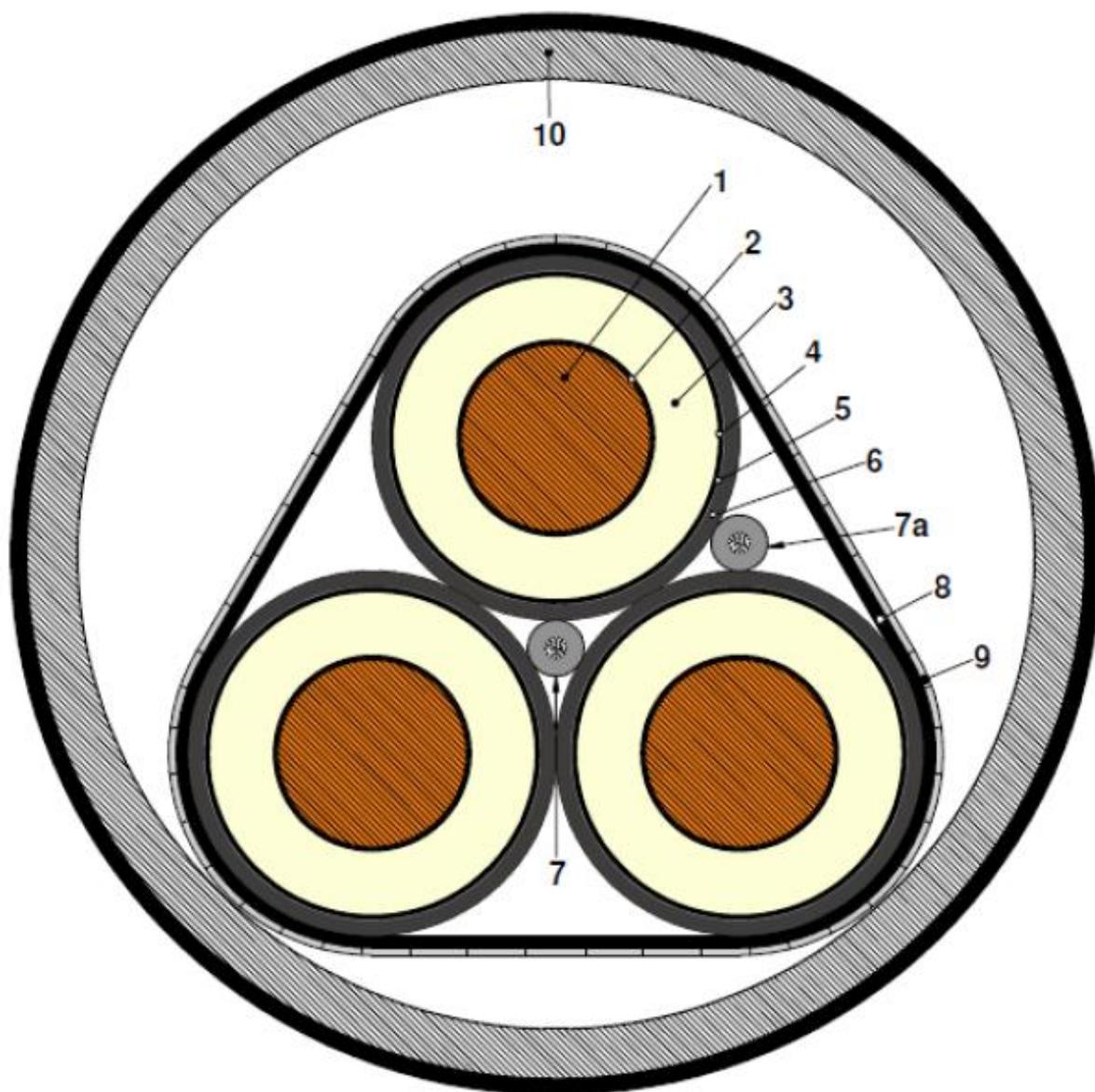


Рис. 3.4 — Разрез CityCable в трубе.

1 — проводник, скрученная медь или алюминий; 2 — фазный полупроводящий слой; 3 — изоляция из сшитого полиэтилена; 4 — внешний полупроводящий слой; 5 — уплотнительная полупроводящая лента; 6 — алюминиево-пластиковая оболочка (алюминиевая лента с покрытием и пластиковая оболочка); 7, 7а — волоконно-оптический кабель; 8 — общая обвязка; 9 — броня из плоской стальной проволоки; 10 — стальная труба.

3.3.3 Монтаж CityCable

При замене маслонаполненных линий высокого давления отрывают и вскрывают трубопровод, потом из трубы извлекаются кабели с БМИ изоляцией, сливается масло.

Масло можно сливать не до конца и осушать трубопровод не нужно, так как изоляция CityCable не потеряет своих характеристик в масле. Предполагаемые силы, воздействующие на кабель, должны рассчитываться заранее. Такие силы включают тяговые усилия и боковое давление в изгибах. В результате расчета тяговых усилий определяется рекомендуемое направление протягивания, следование которому приводит к меньшей механической нагрузке на кабели.

Как правило, барабан располагается в таком положении, которое позволяет протягивать кабель в направлении, в котором на кабеле возникают наименьшие усилия. Необходимо выбирать прочную опору, которая способна выдерживать вес барабана. Барабаны должны разгружаться на ровную поверхность, чтобы не допустить непреднамеренного скатывания. На поверхность опоры не должны устанавливаться объекты, которые могут повредить кабель. Барабан должен размещаться таким образом, чтобы кабель вытягивался из верхней части. Для этого стрелка, указывающая направление размотки, должна указывать в противоположное направлению вращению барабана во время вытягивания кабеля. Перед протяжкой кабеля необходимо убедиться, что внутренний конец кабеля надежно закреплен на барабане. Поскольку барабан должен свободно вращаться во время прокладки кабеля, необходимо поднять барабан над поверхностью опоры как минимум на 50 мм. Следовательно, на стойки барабана или гидравлические домкраты устанавливается вал. Втулки устанавливаются на вал с обеих сторон барабана, чтобы не допустить бокового движения. Необходимо убедиться, что стойки барабана установлены на твердой опоре. Если необходимо, барабан может оставаться на устройстве для перевозки барабанов с кабелем. Если барабан устанавливается в конечном положении, то деревянная обшивка, при ее наличии, может убираться, не повредив кабель. После удаления обшивки необходимо проводить конечную проверку обшивки внешнего слоя кабеля перед началом прокладки кабеля. При необходимости можно провести проверку наружной оболочки. Данное испытание может проводиться в соответствии с ИЕС 60229 при 10 кВ постоянного тока в течение 1 минуты. Должен обеспечиваться доступ к концам кабеля для проведения испытания. Перед протягиванием кабеля необходимо убедиться, что концы кабеля должным образом запечатаны. Соответственно, концы кабеля должны всегда снова закрываться при обрезке кабеля, например, с помощью термоусадочных заглушек. На внутреннюю поверхность заглушек наносится клей для предотвращения попадания воды в кабель.

Протягивается кабель методом «головного протягивания». Трос от лебедки крепится специальным захватывающим устройством за армировку кабеля и производится медленное тяжение с постепенным увеличением усилия тяжения (чтобы не повредить

кабель при рывке). В местах соединений устанавливаются соединительные муфты, они закрываются металлическим футляром. Местом для соединения, как правило, выбираются существующие соединительные колодцы, которые остались после демонтажа кабельной линии высокого давления. При необходимости возводятся новые колодцы для соединения в них кабелей.

Для протяжки CityCables используется механизированная лебедка, в которой максимальное усилие может быть отрегулировано. Мощность тяговой лебедки и, в частности, троса должна быть в два раза выше предполагаемого максимального тягового усилия, чтобы гарантировать достаточный запас прочности. Лебедка должна устанавливаться таким образом, чтобы не допускать протягивания рывками. Необходимо гарантировать непрерывный контроль тягового усилия. После протяжки распечатывается соответствующий протокол. После проверки троса на прочность, он протягивается по трассе кабеля. Трос присоединяется к устройству для протяжки кабеля при помощи шарнира. Шарнир используется для компенсации перекручивания и уменьшения напряжения и повреждений троса. Условия протяжки и направление троса должны быть таким, чтобы исключить повреждение защитных покрытий кабелей.

При протяжке CityCables необходимо проводить калибровку всего трубопровода после засыпки и уплотнения грунта. Это необходимо для того, чтобы гарантировать отсутствие препятствий, например, деформации в трубе, которые приведут к возникновению проблем во время протягивания кабеля. Диаметр калибра должен быть таким, чтобы иметь возможность обнаружения ограничений и повреждений. Диаметр калибра должен быть не менее 85% от внутреннего диаметра трубы. Кроме того, необходимо обеспечить возможность прокладывания дополнительных тросов в участки трубы. Загрязнения и мусор необходимо удалять при помощи щеток.

Для CityCables большой длины особенно важно максимально сокращать усилие протяжки. Для этого в требуемых местах по трассе кабеля устанавливаются устройства проталкивания кабеля. Устройства проталкивания кабеля используются для опоры тяговой лебедки во время прокладки кабеля. Таким образом, сокращается усилие протяжки, что особенно важно в изгибах. Увеличение усилия протяжки, а также радиальных сил можно существенно снизить. Необходимо соблюдать осторожность, чтобы проталкивающие ролики или пояса не сломали кабель. Устройство проталкивания кабеля должно подходить к диаметру трубы. Не допускается превышение максимального допустимого бокового давления кабеля. Требуемые положения для устройств проталкивания кабеля определяются путем расчета протяжки кабеля.

Для прокладки CityCables в открытой траншее, необходимо убедиться, что размеры траншеи и меры безопасности соответствуют требованиям и постановлениям. В зависимости от глубины траншеи и условий почвы стенки траншеи должны иметь наклон или быть защищены деревянной опалубкой, чтобы не допустить разрушения. На дне траншеи не допускается наличие острых камней, дно должно быть покрыто слоем просеянного песка, чтобы исключить повреждение трубы. Трубы, в которых прокладываются кабели, должны быть чистыми и гладкими, не должны иметь никаких преград, 50 см по концам трубопровода должны быть свободны. Это необходимо для того, чтобы исключить попадание камней и земли, что может заблокировать кабели и привести к повреждению его оболочки. Монтажная организация должна продемонстрировать надлежащее качество трубопроводов перед прокладкой кабеля. Трос должен направляться таким образом, чтобы исключить вероятность повреждения трубопровода. Трос должен смазываться перед каждым использованием. Для уменьшения трения могут использоваться канатные смазки. Смазка наносится равномерным слоем на оболочку кабеля во время протягивания. Смазка, пригодная к использованию, растворима в воде и экологически чиста. Для изгибов необходимо использовать угловые ролики. Они должны быть надежно закреплены, особенно на изгибах, чтобы выдерживать усилия протяжки. Особые требования к креплению и размещению роликов определяются на объекте, чтобы принять во внимание фактические условия на данном объекте. Для подготовки изгиба соединяются несколько роликов. Следует соблюдать осторожность для того, чтобы ролики были равномерно распределены, и чтобы кабель не перегибался по краям. Минимальные допустимые радиусы изгиба кабелей должны быть соблюдены. Минимальные значения должны считаться исключением и изгибы должны выполняться с максимально возможным радиусом. Ролик рядом с барабаном должен быть шире остальных. Это необходимо, так как кабель наматывается по всей ширине лебедки, и, следовательно, его положение изменяется во время протяжки. Ширина такого особого ролика составляет 1,5 м.

CityCables должны иметь температуру не ниже -20°C перед прокладкой, чтобы гарантировать необходимую гибкость. Если кабель должен быть проложен при низких температурах окружающей среды, он должен быть прогрет в шатре тепловой пушкой при температуре воздуха в шатре не ниже $+10^{\circ}\text{C}$ в течение не менее 4 часов. Нужно обеспечить, чтобы в течение всего процесса укладки температура кабеля не опускалась ниже -20°C . При таких обстоятельствах кабель должен прокладываться в максимально короткие сроки, чтобы избежать ненужного охлаждения кабеля. При начале протяжения необходимо проверить, не касается ли трос прилегающих объектов и не может ли он

привести к их повреждению. При необходимости, следует устанавливать дополнительные направляющие ролики. Барабан никогда не должен крутиться быстрее, чем вытягиваемый кабель. Рекомендуется протягивать кабель до конечного положения. Останов и повторный запуск приводят к повышению усилия тяжения. Предпочтительно протягивать весь отрезок кабеля без перерывов.

Контроль при прокладке кабеля на всех этапах осуществляет шеф-инженер NKT cables. Так же все изменения в проекте производства работ должны согласовываться с представителем завода-изготовителя.

3.3.4 Приемно-сдаточные испытания и эксплуатация CityCables

После окончания всех строительно-монтажных работ должны быть проведены приемно-сдаточные испытания, благодаря которым можно выявить и своевременно устранить повреждения, вызванные неправильным монтажом или заводским браком. Для кабелей с применением СПЭ изоляции не проводятся испытания выпрямленным напряжением, так как это может привести к выводу кабеля из строя, в связи с тем, что в кабеле происходит образование объемного заряда на микровключениях молекул воды, которые являются инородными. Данный заряд не снимается с кабеля путем заземления, так как образуется «конденсатор» из-за того, что данное включение окружает диэлектрик (сшитый полиэтилен). При подаче рабочего напряжения напряженности суммируются и локально появляются треки, так как после в них происходит развитие частичных разрядов, которые приводят к пробое изоляции кабеля. В связи с этим испытания проводятся повышенным переменным напряжением. Согласно ПУЭ 7 издания испытания повышенным напряжением промышленной частоты проводятся для кабелей 110-500 кВ. Величина испытательного напряжения для 110 кВ — 220 кВ (по отношению к земле 130 кВ); для линий 220 кВ — 500 кВ (по отношению к земле 288 кВ). Длительность таких испытаний не превышает 5 минут. Считается, что кабель успешно прошел испытания, если не было пробоя изоляции, отсутствовали скользящие разряды и толчки тока утечки или его возрастание после достижения установившегося значения. Проверяется фазировка кабельной линии (проверяется совпадение обозначения фаз подключаемых жил). Для кабелей проводится измерение активного сопротивления жил постоянному току, которое приводится к 1 мм² сечения, 1 м длины и +20°С. Оно должно быть для медных жил не более 0,0179 Ом, для алюминиевой жилы не более 0,0294 Ом. Так же определяется электрическая емкость жил. Измеренная емкость, приведенная к удельным величинам, не

должна отличаться от заводских измерений более чем на 5 %. Проводится измерение распределения тока, оно не должно превышать 10 %. Измеряется тангенс угла диэлектрических потерь, а так же проводится тепловизионный контроль концевых муфт и вводов. Перед проведением испытаний обязателен визуальный осмотр всей кабельной линии, при обнаружении эффектов они устраняются и только после этого начинаются испытания. После проведения всех вышеперечисленных испытаний, кабельная линия считается принятой в эксплуатацию.

Во время эксплуатации проводятся периодические осмотры кабельной линии для трасс, проложенных в земле, осмотр производится не реже одного раза в месяц, а так же осмотр должен проводиться ИТР не реже одного раза в месяц. Для своевременного определения и предотвращения аварий современные кабельные линии оснащаются приборами для контроля частичных разрядов, температуры, которые ведут непрерывный мониторинг и регистрацию параметров КЛ. Периодически проводится измерение тангенса угла диэлектрических потерь, благодаря которому можно узнать о развивающихся дефектах в изоляции и предотвратить аварии. Осуществляется тепловизионный контроль кабеля, муфт, контактных соединений. Для обеспечения бесперебойным электроснабжением потребителей, проводятся планово-предупредительные ремонты, которые гораздо проще и дешевле выполнить, чем восстановление линии после аварии.

4. АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В настоящее время в отечественных сетях, а в частности в Московской энергетической системе до сих пор используются маслонеполненные кабельные линии высокого давления (приблизительно 35 % от общей структуры линий электропередачи). Эксплуатация данного типа кабеля ведется уже не первое десятилетие и в связи с этим накопился огромный практический и теоретический опыт применения данного кабеля. Энергетиками страны по достоинству оценены положительные стороны БМИ изоляции, такие как:

1. возможность восстановления изоляционных свойств после устранения аварийной ситуации;
2. возможность регулировать температуру кабеля при перегревании с помощью АПУ и другие.

Но как бы ни был хорош данный тип изоляции, он все же обладает рядом недостатков:

1. Ограничение в разности уровней прокладки кабеля. Это связано с тем, что при резких перепадах по трассе кабельной линии масло, которое должно свободно перемещаться по трубопроводу будет скапливаться в одном месте. Для его передвижения будет требоваться дополнительное оборудование.
2. Ограниченная передаваемая мощность. Данное ограничение связано с тем, что у бумажно-масляной изоляции относительно низкая длительно-допустимая рабочая температура (около 70°C). Что естественно сказывается на пропускной способности линии.
3. Частые повреждения кабеля и так далее. В связи с частыми перегрузками и низким показателем длительно-допустимой температуры изоляция кабеля не справляется.

При отсутствии альтернативных вариантов данный тип кабеля использовался повсеместно. Для повышения надежности электроснабжения потребителей, а также повышения нагрузочных требований принимались дополнительные меры. Возводились резервирующие линии на случай отказа основной, прокладывались параллельные, что соответственно приводило к усложнению электрических схем, а так же повышению затрат на возведение и эксплуатацию. Из-за частых повреждений в штате эксплуатирующей

организации должны быть квалифицированные специалисты для поиска и устранения аварийных ситуаций. Так же бумажно-масляная изоляция обладает высокой гигроскопичностью, что резко снижает ее диэлектрические характеристики.

Помимо всего прочего при возведении маслonaполненной линии требуется дополнительная аппаратура для хранения масла, подпитки линии, так же требуется место, где оно будет располагаться. В зависимости от длины линии количество данной аппаратуры и помещений для нее будет варьироваться. Для заполнения трубопровода рекомендуется применять высоковязкое кабельное масло С-220 (вязкость до 800 кг/м^3 при 20°C). Данное масло является нефтяным маслом высокой степени очистки и стоит относительно дорого (около 1200 р. за 1 кг). К примеру для заполнения 1 метра трубы внутренним диаметром 152 мм и проложенной внутри кабельной линией выполненной 3-мя однофазными кабелями сечением 625 мм^2 понадобится около 15 кг масла. Но как мы знаем, современные кабельные линии не ограничиваются длиной в один метр, а достигают порой нескольких километров. Нетрудно догадаться, что для заполнения трубопровода КЛ потребуется большое количество масла, которое стоит немалых денег. В дополнение ко всему нужно иметь запас масла в объеме не менее 5% от общего объема используемого масла в кабельной линии на случай протечек, слива масла для испытания, утечек при ремонте и так далее. Разрешается использовать для заливки в трубопровод маловязкое минеральное масло МН-4, его цена значительно ниже (около 200 р. за 1 кг). Но его очистка несколько хуже, чем у С-220, соответственно незначительно, но ниже электрические характеристики.

Монтаж маслonaполненного кабеля довольно долгий процесс. Это связано с тем, что от начала строительства кабельной линии и до ее приемки в эксплуатацию нужно выполнить ряд трудоемких операций. Для начала требуется вырыть траншею глубиной не менее 1,5 м, затем проложить и сварить стальной трубопровод, построить колодцы для соединительных муфт, места для размещения аппаратуры, провести протяжку кабеля, заполнение маслом трубопровода, испытание кабельной линии, засыпка траншеи и восстановление дендрологии местности.

Во время эксплуатации проводятся периодические осмотры как самой кабельной линии, так муфт, кабельных колодцев и автоматических подпитывающих устройств. Обязательная проверка отсутствия течей масла, давления масла в линии, проверка диаграмм с регистрирующего манометра для своевременного выявления дефекта и его предотвращения. При обнаружении течи масла место замораживают с двух сторон для герметизации трубы. Заморозку проводят при помощи азота.

Для контроля характеристик масла отбираются пробы для проведения анализа. Отбор проб проводится через год после ввода в эксплуатацию, потом через 3 года, а в последующем раз в 6 лет из концевых, полустопорных муфт и подпитывающей аппаратуры. При обнаружении отклонения параметров от предыдущего анализа на 30% периодичность отбора проб сокращается в соответствии с местными условиями. При появлении в масле газовых включений, которые можно выявить при помощи хроматографического анализа, проводится дегазация масла в передвижных установках с последующей закачкой в трубопровод.

При повреждении кабеля вследствие внутренних причин для начала требуется обнаружить место пробоя. Это можно осуществить при помощи акустического метода с высокой точностью, если произошло приваривание жилы к стенкам трубы, то определить место повреждения можно при помощи источника постоянного тока и вольтметра. Проводится вскрытие траншеи, заморозка трубопровода с обеих сторон от места повреждения и после этого вскрывается трубопровод. Определяется длина заменяемого участка при помощи проверки t_{gd} отдельных слоев бумаги. После проводится монтаж и дегазация масла, так как при коротком замыкании выделяются газы, которые ухудшают диэлектрические свойства масла. Полная замена строительной длины кабеля без перерывов работ с начала замораживания до подачи напряжения составляет от 14 до 16 суток, которые делятся на 2 этапа. В первом этапе проводится заморозка, вскрытие и ремонт кабеля. Первый этап длится от 5 до 6 суток. Во втором этапе проводится монтаж соединительных муфт, вакуумирование и заполнение трубопровода маслом, подготовка для подачи напряжения. Второй этап занимает от 9 до 10 суток.

Контролем состояния кабельной линии и координацией эксплуатационных работ занимается диспетчерская служба. Для обслуживания КЛ должна быть оперативная бригада, состоящая из: 1 диспетчера, 1-2 электромонтера, 1-2 шофера-электромонтера. Так же в распоряжении смены на диспетчерском пункте в обязательном порядке должны находиться:

1. диспетчерский щит, отражающий схему кабельной линии;
2. схемы электроснабжения всех помещений, в которых имеется аппаратура для КЛ;
3. карта города с нанесенной КЛ;
4. дежурный автомобиль;

5. диспетчерская связь с диспетчером энергосистемы или предприятия;
6. схема всех линий, кабельных сооружений и так далее.

Диспетчерская служба выполняет широкий спектр задач:

1. осуществляет немедленное реагирование при возникновении аварийных ситуаций;
2. проводит осмотры, текущие ремонты, отборы проб масла;
3. осуществляет контроль над проведением земляных работ вблизи линии;
4. организовывает и контролирует аварийно-восстановительные работы;
5. ведет всю оперативную документацию, выдает оперативные разрешения для проведения работ на линиях и так далее.

Благодаря наличию оперативной диспетчерской службы удастся повысить надежность электроснабжения потребителей, а так же сократить срок проведения ремонтно-восстановительных работ.

Но прогресс не стоит на месте, и был разработан новый электроизоляционный материал, такой как сшитый полиэтилен. В настоящее время около 70% кабельных линий напряжением 110 — 500 кВ выполнены кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Данный тип кабеля обладает рядом преимуществ по сравнению с маслонаполненными кабелями такими как:

1. выше длительно-допустимая рабочая температура 90°C, а так же температура при перегрузке 130°C (при перегрузке не более 100 ч в год и 1000 за весь срок эксплуатации);
2. благодаря такой высокой рабочей температуре удалось повысить пропускную способность кабелей при том же сечении жил, что и маслонаполненные кабели;
3. отсутствуют ограничения по перепаду высот по трассе кабельной линии, так как нет пропиточного состава, который может стечь;
4. низкий тангенс угла диэлектрических потерь, в связи с чем ниже потери в изоляции;
5. ниже эксплуатационные издержки, а так же капиталовложения, так как не используется масло, для которого требуются резервуары для хранения,

дегазационные установки, сушильные установки, не требуется применение трубопровода по всей длине КЛ;

6. высокая степень экологической безопасности, так как нет масла, которое при протечке может нанести вред окружающей среде;

7. меньший процент повреждаемости по сравнению с МНК высокого давления;

8. выше термическая устойчивость к токам короткого замыкания 250°С против 200°С для маслонаполненных кабелей;

9. ниже допустимая температура при прокладке без предварительного прогрева до -5°С;

10. уменьшенный вес, радиус изгиба и диаметр кабеля, что позволяет облегчить и сделать более удобной прокладку, особенно на сложных участках трассы;

11. низкая гигроскопичность и другие.

Благодаря данным положительным качествам данные кабели стали использоваться повсеместно, постепенно вытесняя маслонаполненные. В настоящее время накопился достаточно обширный опыт эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, что позволяет судить о его высокой эффективности. Но, как и всегда помимо достоинств, проявляются недостатки, такие как:

1. относительная дороговизна кабеля по сравнению с МНК (отличается в 1,5-2 раза);

2. наличие токов в экранах кабеля, которые порой достигают токов, протекающих по жилам кабеля, но с этой проблемой научились бороться при помощи транспозиции экранов кабеля в специальных транспозиционных колодцах.

Несмотря на наличие некоторых недостатков, кабели со СПЭ изоляцией продолжают применяться, так как их можно скомпенсировать. Эксплуатирующие организации при реконструкции и возведении новых кабельных линий указывают в выдаваемых технических заданиях необходимость применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Это зачастую связано с тем, что во время эксплуатации кабель не требует каких либо работ, если не было повреждения. За счет этого резко снижаются эксплуатационные расходы.

Прокладка линий, выполненных кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена, осуществляется несколько быстрее, так как при равных длине, сечении кабеля, степени загруженности грунта коммуникациями отпадают трудоемкие операции. К ним относятся:

1. подготовка стального трубопровода по всей длине КЛ;
2. вакуумирование линии и заливка масла в трубопровод;
3. установка маслоподпитывающей аппаратуры и так далее.

Но для монтажа СПЭ кабеля требуется более высокая квалификация работников, нежели при монтаже кабеля с БМИ изоляцией. Так как при неправильном монтаже соединительных муфт или несоблюдении условий тяжения, кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена не пройдет сдаточные испытания. Но данные траты окупятся во время эксплуатации, так как не требуется пополнение масла, его дегазация, сушка и так далее.

В период эксплуатации кабелей со СПЭ изоляцией, так же как и МНК требуется периодический осмотр линии для выявления нарушений на территории охранной зоны, а так же исключения развития дефектов. Периодичность осмотров представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Периодичность осмотра трассы КЛ и сооружений КЛ с «Ситикабелем»

Место прокладки КЛ / сооружения КЛ	Периодичность осмотров
Трассы кабельных линий, проложенные в земле	1 раз в месяц
Трассы кабелей проложенные в кабельных сооружениях	1 раз в 3 месяца
Трассы кабелей по закрытым территориям	2 раза в месяц
Кабельные колодцы	1 раз в 3 месяца
Концевые муфты в центрах питания	1 раз в месяц

Для надежной работы кабельной линии периодически проводят испытания защитных покровов (через год после ввода в эксплуатацию, далее раз в 3 года), тепловизионный контроль концевых устройств (1 раз в 2 года), мониторинг частичных разрядов (1 раз в год), измерение токов в заземлении экранов и в узлах транспозиции (1 раз в 6 месяцев). Оперативно-диспетчерское управление должно быть, так же как и для маслonaполненных линий. Это позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей и ускорить время реагирования на возникающие аварийные ситуации.

Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена типа «Ситикабель» по своей сути является улучшенным вариантом обычного кабеля со СПЭ изоляцией. Он обладает теми же достоинствами что и однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена. Основным отличием, сразу бросающимся в глаза, является его трехфазное исполнение. Так же наличие защитного покрова из плоских стальных проволок поверх изоляции повышает механическую защиту кабеля как при прокладке в стальных трубопроводах от маслонаполненных линий, так и при обыкновенной траншейной прокладке.

Данный кабель был разработан специально для замены маслонаполненных линий высокого давления. Его исполнение подходит для этого как нельзя лучше, так как он обладает рядом преимуществ:

1. не требуется прокладывать новое направление трассы кабельной линии, что уменьшает количество согласований, а так же очень актуально в условиях плотной городской застройки;
2. он не боится масла, так что при демонтаже старого кабеля не требуется осушать трубопровод;
3. благодаря защитному покрову из плоских стальных проволок исключены повреждения при протяжке в трубе;
4. исходя из конструкции кабеля, его протяжка осуществляется сразу 3-мя фазами, ускоряя процесс монтажа;
5. благодаря использованию уже готового трубопровода отпадает необходимость рытья траншеи, достаточно вырыть котлованы с двух сторон линии для открытия стального трубопровода;
6. не требуется восстановление зеленых насаждений на трассе КЛ;
7. не требуется строительство новых колодцев, так как возможно применение существующих колодцев;
8. из-за того что не требуется проведения ряда трудоемких работ, прокладка линии значительно ускоряется.

Так же отличительной чертой «Ситикабеля» является возможность размещения в конструкции волоконно-оптического кабеля для мониторинга температуры, а так же для передачи данных. Это повышает ее защищенность, так как волоконно-оптический кабель

(ВОК) находится внутри оболочки из плоских стальных проволок. Это позволяет не прокладывать отдельно волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС).

Так как производится данное изделие исключительно в Германии, то оно является достаточно уникальным для отечественной энергетики, его использование пока не приобрело широких масштабов. В настоящее время в нашей стране эксплуатируется всего 3 линии, выполненные данным кабелем, который заменил устаревшие маслonaполненные линии. Одна линия проложена в Санкт-Петербурге на ПС 220 кВ Чесменская, две расположены в Москве. Одна из линий проложена в самом центре города под Софийской набережной и соединяет старейшую электростанцию ГЭС №1 с ее филиалом. Сравнение кабелей с бумажно-масляной изоляцией, сшитого полиэтилена и «Ситикабеля» представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Сравнение рассмотренных кабельных изделий

Тип кабеля	Кабель с БМИ	1-ф кабель со СПЭ	3-ф кабель типа
Характеристики	высокого давления	изоляция	«Ситикабель»
Стоимость за метр ¹ , руб.	1500 ²	2700	14000 ³
Наличие масла	да	нет	нет
Прокладка 3-х фаз	да	нет	да
Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ	0,003-0,005	0,00015-0,0002	0,00015-0,0002
Защита от механических повреждений	да	нет	да
Ограничения по перепаду высот	да	нет	нет
Срок службы	35	30	30
Длительно допустимая рабочая температура / допустимая температура при перегрузке, t°С	70/90	90/130	90/130

1 — указана стоимость кабеля для БМИ 625 мм ² ; для СПЭ 630 мм ² ; для «Ситикабеля» 630 мм ²
2 — учтена только стоимость кабеля. В дополнение к нему идет стоимость масла, на 1 метр трубы около 20000 руб., так же стоимость самой трубы ≈ 3600 руб. за метр.
3 — указана стоимость 1 метра полной сборки из 3 фаз и металлической оплетки. Цена может варьироваться в зависимости от курса единой европейской валюты, а так же объема поставки.

Исходя из таблицы 4.2 и вышеперечисленных данных видно, что «Ситикабель» имеет ряд преимуществ при замене маслонаполненных кабельных линий высокого давления:

1. использование данного кабеля позволяет не проводить земляные работы по всей длине кабельной линии, сохраняя все существующие коммуникации и инфраструктуру города;
2. не требуется проведение дополнительных мероприятий по защите КЛ, если только не прокладываются дополнительные коммуникации в непосредственной близости от трассы, так как используется существующий трубопровод, позволяющий обеспечить необходимую защиту;
3. для возведения КЛ потребуется задействовать меньшее число специалистов и строительной техники, что позволит сократить часть затрат;
4. благодаря отсутствию необходимости земляных работ сократится время от начала строительства до включения напряжения на линии;
5. так же улучшится качество монтажа и в целом работ по прокладке данного кабеля, так как на строительной площадке всегда присутствует шеф-инженер от завода изготовителя кабеля, который позволит избежать ошибок при возведении линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации рассмотрен способ замены устаревших маслонаполненных линий высокого давления. Проведен анализ высоковольтных сетей города Москвы для определения количества МНК и оборудования, превысившего нормативный срок эксплуатации.

Исходя из всех вышеперечисленных данных, можно сделать вывод, что «Ситикабель» уникальное изделие, которое подходит для замены устаревших маслонаполненных линий высокого давления. Данный кабель обладает рядом преимуществ перед кабелями с БМИ. Надежность кабеля проверена временем, так как были проведены заводские испытания и, что немаловажно, он был испытан в реальных условиях. Основным его преимуществом является бестраншейная прокладка в существующих трубах, что очень важно в условиях плотной городской застройки, а так же по территории и вблизи объектов культурного наследия. Сроки прокладки значительно сокращаются, так как нет необходимости проводить огромный объем работ связанный с рытьем траншей, восстановлением ландшафта и, соответственно, оплаты труда рабочих, которые будут осуществлять выполнение данных работ. Благодаря этому возможно сокращение затрат на возведение линии. Так же замена кабеля позволит увеличить пропускную способность линий.

Однако следует принимать во внимание те факты, что применение данного кабеля при реконструкции становится бессмысленным, если:

1. новый кабель не проходит по габариту существующей трубы;
2. пропускная способность нового кабеля оказывается ниже, чем у старого.

При выполнении вышеперечисленных условий, а так же преимущества «Ситикабеля» позволяют с уверенностью говорить, что данный кабель можно рекомендовать для замены маслонаполненных линий высокого давления, особенно в условиях крупных городов с плотной застройкой.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ВЛЭП — воздушная линия электропередачи
КЛЭП — кабельная линия электропередачи
СВАО — Северо-Восточный автономный округ
ОЭС — объединенная энергетическая система
СПЭ — сшитый полиэтилен
КВЛ — кабельно-воздушная линия
БМИ — бумажно-масляная изоляция
МНК — маслonaполненный кабель
ЮЗАО — Юго-Западный административный округ
ТиНАО — Троицкий и Новомосковский административный округ
ЧР — частичные разряды
ЛЭП — линия электропередачи
СЭС — система электроснабжения
ИП — источник питания
ПС — подстанция
РУ — распределительное устройство
ПДН — полиэтилен низкого давления
КРУЭ — комплектное распределительное устройство элегазовое
ПК — персональный компьютер
СНГ — Союз независимых государств
РПН — регулирование под напряжением
ВДТ — вольтдобавочный трансформатор
АТ — автотрансформатор
ГЭС — государственная электрическая станция
ОРУ — открытое распределительное устройство
АПУ — автоматическое подпитывающее устройство
ПУЭ — правила устройства электроустановок
ИТР — инженерно-технический работник
ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи
ВОК — волоконно-оптический кабель

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: от 19 июня 2003 года №229: (Принят министерством энергетики Российской Федерации): (с изменениями от 13 февраля 2019 года) // Приказ министерства энергетики Российской Федерации. — 245 с.
2. Об утверждении энергетической стратегии России на период до 2020 года: от 28 августа 2003 года №1236-р: (Принят Правительством Российской Федерации): (с изменениями от 15 июня 2009 года) // Распоряжении Правительства Российской Федерации. — 125 с.
3. О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон: Постановление правительства Российской Федерации от 24 февраля 2009 года № 160: (с изменениями от 21 декабря 2018 года) // Постановление правительства Российской Федерации. — 10 с.
4. О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2016-2021 годы. Распоряжение №224 мэра Москвы от 5 апреля 2017 г., 2017. — 114 с.
5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 7 изд. с изм. и доп. — М.: Кронус, 2009. — 488 с.
6. ГОСТ 16441-78. Кабели маслонаполненные на переменное напряжение 110-500 кВ. Технические условия. — Москва: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1978 — 42 с.
7. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с изменениями №1, 2). Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. — 39 с.
8. ГОСТ Р МЭК 62067-2017. Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ($U_m=170$ кВ) до 500 кВ ($U_m=500$ кВ). Методы испытаний и требования к ним. — Москва: Стандартинформ, 2017 — 50 с.

9. ГОСТ 15845-80. Изделия кабельные. Термины и определения. — Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980 — 18 с.
10. ГОСТ Р МЭК 62067-2011. Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ($U_m=170$ кВ) до 500 кВ ($U_m=550$ кВ). Методы испытания и требования к ним. — Москва: Стандартинформ, 2012.— 36 с.
11. ГОСТ ИЕС 60811-1-1-2011. Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. — Москва: Стандартинформ, 2012. — 24 с.
12. ГОСТ 18690-82. Кабели, провода, шнуры и кабельная арматура. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение. — Москва, Государственный стандарт союза ССР, 1982. — 23 с.
13. ГОСТ 8463-76. Масло С-220. Технические условия. — Москва, Стандартинформ, 2011. — 5 с.
14. ТУ 38 101606-76. Масло кабельное МН-4 для маслонаполненных кабелей. Технические условия. — Горький, Горьковский НМЗ, 1976. — 16 с.
15. СТО 56947007-29.240.85.046-2010. Инструкция по эксплуатации силовых маслонаполненных кабельных линий напряжением 110-500 кВ. — ОАО «ФСК ЕЭС», 2010 — 70 с.
16. СТО 56947007-29.060.20.170-2014. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Стандарт организации. — ОАО «ФСК ЕЭС», 2014 — 102 с.
17. СТО 70238424.29.240.20.011-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. — Москва, Некоммерческое Партнерство «Инновации в электроэнергетике», 2011. — 41 с.
18. ТД-16-01П. Руководство по прокладке силовых кабелей и изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 110-500 кВ. — НОЧУ «ЦПК «Прокладка и монтаж», 2016 — 125 с.

19. Стандарт организации ОАО «Ленэнерго». Руководящие указания по выбору, сооружению и технологии эксплуатации кабельных линий напряжением 6-110 кВ на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. — Санкт-Петербург, 2012. — 175 с.

20. Макиенко Г. П., Попов Л. В. Кабельные маслонаполненные линии 110-500 кВ высокого давления / Г. П. Макиенко, Л. В. Попов. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 104 с.

21. Макиенко Г. П., Попов Л. В. Маслонаполненные кабели на 110 кВ / Г. П. Макиенко, Л. В. Попов — Москва: Энергия, 1979. — 103 с.

22. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. — 2-е изд. — М.: Интермет Инжиниринг, 2006. — 672 с.

23. Канискин В. А., Таджибаев А. И. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 1. Конструкция силовых электрических кабелей. / В. А. Канискин, А. И. Таджибаев. — Учебное пособие. — Санкт-Петербург, 2001. — 60 с.

24. Белорусов Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. / Н. И. Белорусов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева; под редакцией Н. И. Белорусова. — 5-е издание, дополненное и переработанное. — Москва: Энергоатомиздат, 1988. — 526 с.

25. История электротехники. / Под ред. И. А. Глебова. — М.: Издательство МЭИ, 1999. — 524 с.

26. Макаров Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ: В 6-ти томах. / Под редакцией главных специалистов Мосэнерго И. Т. Горюнов, А. А. Любимова. — Москва: Папирус Про, 2003- Т. 2. — 622 с.

27. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

28. Лыкин А. В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. — М.: Университетская книга; Логос, 2008. — 254 с.

29. Веников В. А., Жуков Л. А., Поспелов Г. Е. Режимы работы электрических систем и сетей. / В. А. Веников, Л. А. Жуков, Г. Е. Поспелов; Под редакцией В. А. Веникова. Учебное пособие для электроэнергетических вузов. — М., Высшая школа, 1975. — 344 с.

30. Костин В. Н., Распопов Е. В., Родченко Е. А. Передача и распределении электроэнергии. / В. Н. Костин, Е. В. Распопов, Е. А. Родченко. Учебное пособие. — СПб.: СЗТУ, 2003. — 147 с.

31. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов. / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь; Под общей редакцией В. П. Ларионова. — 3-е издание переработанное и дополненное. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.

32. Буре И. Г. Расчеты параметров и режимов электрических сетей промышленных предприятий. / И. Г. Буре, Л. С. Родина; Под общей редакцией С. И. Гамазина. — М.: Московский энергетический институт, 1989. — 102 с.

33. Быстров А. В. Разработка методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-500 кВ: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09.03 / Быстров Алексей Владимирович; Национальный исследовательский университет «МЭИ». — Москва, 2014. — 92 с.

34. Неуйминг В. Г. Программный комплекс «RastrWin3». Руководство пользователя. — Екатеринбург, 2012. — 243 с.

35. Нормативная документация NKT Cables — завода-изготовителя «Ситикабеля».

36. Перспективы развития высоковольтных сетей на примере Московского региона: Материалы XII Всемирного электротехнического конгресса. Москва, 6 октября 2011 г. / Отв. ред.: Н. Г. Шульгинов, Ю. Н. Кучеров, В. И. Чемоданов, Н. Н. Утц, Д. Н. Ярош. — Москва. : ВЭЛК, 2011. — 17 с.

37. Юдина Л. Многоэтажки подземелья // Кабель news. — 2013. — №5. — с. 16-21.

38. Пешков И. Б. История создания и развития Всероссийского научно-исследовательского института кабельной промышленности // Кабели и провода. — 2017. — Спецвыпуск. — с. 3-8.

39. Некрасов М. Л. Производители силовых кабелей на среднее и высокое напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена в России и странах СНГ. Краткий обзор // Кабель news. — 2007. — №9. — с. 40-43.

40. Пешков И. Б., Уваров Е. И. Кабельная промышленность — 100 лет в содружестве с энергетиками. / Строители России. XX век. // Электроэнергетика. — Москва: Мастер — 2003. — с. 446-452.

41. Пешков И. Б. Кабельная промышленность: ситуация и перспективы развития // Электротехника. — 2000. — №1. — с. 9-12.

42. Пешков И. Б. Мировая кабельная промышленность: переход в новый век // Кабели и провода. — 2001. — №4. — с. 3-6.

43. Дмитриев М. Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Сети России. — 2015. — №3. — с. 62-67.

44. Дмитриев М. Проектирование и строительство кабельных линий 6-500 кВ. Актуальные проблемы // Новости ЭлектроТехники. — 2015 — №4. — с. 2-4.

45. Филиал ОАО «МОЭСК» — Высоковольтные кабельные сети впервые в Москве применил «СитиКабель». Режим доступа: [https://rusensys.ru/industry-news/Filial_OAO_MOESK -
_Vysokovolytnye_kabelnyye_seti_vpervye_v_Moskve_primenil_SitiKabely/](https://rusensys.ru/industry-news/Filial_OAO_MOESK_-_Vysokovolytnye_kabelnyye_seti_vpervye_v_Moskve_primenil_SitiKabely/)

46. ОАО «Москабельсетьмонтаж» преступило к прокладке сити-кабеля производства «NKT cables». Режим доступа: [https://www.ruscable.ru/news/2013/09/03/OAO_Moskabelysetymontazh_prestupilo_k_prokladk
e_si/](https://www.ruscable.ru/news/2013/09/03/OAO_Moskabelysetymontazh_prestupilo_k_prokladke_si/)