

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЮЖНО–УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



ТАВАРОВ САИДЖОН ШИРАЛИЕВИЧ

**ЗАЩИТА ЛИНЕЙНОГО ПЕРСОНАЛА, ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 кВ В РЕСПУБЛИКЕ
ТАДЖИКИСТАН**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор **А.И. Сидоров**

Челябинск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ		Стр.
ВВЕДЕНИЕ		4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ		9
1.1 Общая характеристика воздушных линий напряжением 500 кВ Республики Таджикистан.....		10
1.2 Проблемы, связанные с эксплуатацией линий напряжением 500 кВ.....		16
1.3 Методы защиты персонала, занятого обслуживанием линий напряжением 500 кВ.....		22
1.4 Задачи исследования.....		27
ГЛАВА 2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 кВ		28
2.1 Анализ методик исследования распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ.....		29
2.2 Методика исследования электрического поля применительно к условиям Республики Таджикистан.....		31
2.3 Апробация методики на отдельных участках ВЛ, аналогичных условиям Республики Таджикистан.....		38
2.4. Выводы.....		46
ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ВЛЭП 500 кВ		47
3.1 Анализ методов расчета напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ.....		47
3.2 Разработка методики построения распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ с помощью вычислительного кластера.....		54

3.3 Карты распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, построенные с помощью вычислительного кластера.....	58
3.4 Сопоставление результатов, полученных расчетным путем и экспериментальным способом.....	61
3.5 Выводы.....	66
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ МЕР ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО ИЛИ РАБОТАЮЩЕГО, ВБЛИЗИ ВЛЭП 500 кВ.....	67
4.1 Применение расчетных карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ.....	67
4.2 Проект организации работ при обслуживании линий электропередачи напряжением 500 кВ с учетом условий Республики Таджикистан.....	71
4.3 Оценка эффективности внедрения проекта организации работ при обслуживании линий электропередачи напряжением 500 кВ с учетом условий Республики Таджикистан.....	79
4.4 Выводы.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
ЛИТЕРАТУРА.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Линии электропередачи в Республике Таджикистан, как и любой другой объект электроэнергетики, нуждаются в обслуживании, которое осуществляется как при эксплуатации, так и при ведении ремонтных работ.

В Республике Таджикистан общая протяжённость существующих линий электропередачи напряжением 500 кВ, построенных во времена Советского Союза, составляла 115 км. Это две двухцепные линии, с двумя подстанциями 500 кВ Нурек и Регар.

После отключения Республики Таджикистан от Единой энергетической системы перед правительством страны, в связи с увеличением в последние годы электропотребления, была поставлена задача строительства новых линий электропередачи 500 кВ для обеспечения электроэнергией крупных городов. Так, для энергодефицитной северной части страны в 2009 году были построены две линии напряжением 500 кВ общей протяжённостью 263,5 км. В данный момент, согласно проекту CASA–1000, в стране запланировано к 2015 году построить продолжения линий 500 кВ Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан) и Рогун – Сангтуда – Кундуз – Кабул – Пешавар.

Линии электропередачи напряжением 500 кВ проходят в северной части Таджикистана по местности, где возвышения над уровнем моря имеют отметки от 1500 до 2500 м, а в юго-западной – до 2000 м.

Годовой ход температуры воздуха вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ, проходящих по северной части территории, в пределах от плюс 30°С до минус 24°С, а на юго-западе – в пределах от плюс 45°С до плюс 0,3°С.

Указанные выше особенности создают определенные трудности для линейного персонала при расчистке трассы линии электропередачи напряжением 500 кВ, а также осмотрах этой линии, проводимых два раза в год.

Учитывая состояние экономики Республики Таджикистан, перспективы развития линий 500 кВ, необходимо разработать такие предложения по защите

линейного персонала от вредного воздействия электрических полей промышленной частоты, реализация которых не требовала бы значительных затрат и могла быть осуществлена в кратчайшие сроки. При этом необходимо учитывать, что высокие температуры окружающего воздуха в летний период времени приводят к значительным увеличениям напряженности электрического поля, связанным с увеличением стрелы провеса проводов.

Все это доказывает актуальность данной работы.

Цель работы – обосновать и разработать предложения по защите линейного персонала линий электропередачи напряжением 500 кВ от вредного воздействия электрических полей промышленной частоты (ЭП ПЧ) с учетом условий Республики Таджикистан.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Разработать методику построения распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль линии электропередачи 500 кВ с помощью вычислительного кластера, учитывающую топографию местности и температуру окружающего воздуха.

2. Оценить данные расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ, построенных по разработанной методике, сопоставив эти данные с результатами инструментальных исследований.

3. С использованием разработанной методики рассчитать распределения напряженности ЭП ПЧ для всех пролетов линии 500 кВ, проходящей по юго-западной части Республики Таджикистан, для различных температур окружающего воздуха.

4. На основании расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ разработать предложения по защите линейного персонала при ведении работ вдоль ВЛЭП 500 кВ.

Объект исследования – напряженность электрического поля промышленной частоты вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ.

Предмет исследования – закономерности в изменении напряженности электрического поля вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ.

Методологическая и теоретическая основа исследования: в основу данной работы легли труды Г.Н. Александрова, Ю.Г. Григорьева, П.А. Долина, А.Ф. Дьякова, Т.И. Кривовой, К.Б. Кузнецова, Е.С. Колечицкого, Н.Б. Рубцовой, А.И. Сидорова, А.Ю. Токарского. и др. ученых, внесших большой вклад в изучение действия электрического поля промышленной частоты (ЭП ПЧ) на биологические объекты, в том числе и на организм человека, разработку нормативов, а также способов и средств защиты от воздействия ЭМП ПЧ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются корректным использованием метода конечных элементов при разработке компьютерных моделей пролетов линий электропередачи напряжением 500 кВ, удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных результатов определения напряженности ЭП ПЧ.

Научная новизна, основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Впервые получена компьютерная модель пролетов ВЛЭП 500 кВ Республики Таджикистан, отличающаяся учётом изменения как продольного, так и поперечного рельефа местности и температуры окружающего воздуха.

2. Разработана методика построения распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ с помощью вычислительного кластера.

3. Разработан руководящий документ по методике построения карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ.

4. Развитие способа защиты временем, заключающегося в обосновании применения карт распределения напряженности электрического поля для организации работ вдоль линии электропередачи 500 кВ.

Практическая значимость работы и реализация ее результатов:

1. Разработан и утвержден руководящий документ РД-1М-001-2014 «Построение карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ» для ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан.

2. Предложен проект организации работ при обслуживании ВЛЭП 500 кВ с учетом условий Республики Таджикистан.

3. Применение предложенного проекта организации работ при обслуживании ВЛЭП 500 кВ за счет правильного подбора благоприятного периода времени года (с начала сентября до середины октября) обеспечивает соответствие санитарным нормам приведенного времени пребывания линейного персонала в зоне действия ЭП ПЧ, и, кроме того, позволяет вовлечь дополнительно в сельскохозяйственный оборот в среднем на один пролет 56 соток земли.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют области исследований специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика), в частности, п.7 «Научное обоснование, конструирование, установление области рационального применения и оптимизация параметров способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов».

Апробация работы. Диссертационная работа и ее основные положения докладывались и обсуждались на международной республиканской научно-практической конференции «Перспективы энергетики Таджикистана» г. Душанбе, 2011 г.; V–Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», г. Челябинск, 2012 г.; VI Международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире», г. Чита, 2013 г.; LI–LIII международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2012–2014 г.; 4–6 научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012–2014 г.; 64–65 научных конференциях «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 2012–2013 г.; III Всероссийской студенческой конференции (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», г. Челябинск, 2014 г.; на семинарах аспирантов и докторантов кафедры «БЖД» ЮУрГУ (НИУ) г. Челябинск 2012–2014 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, в том числе 4 работы – в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 115 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 8 таблиц, 110 наименований литературы и 1 приложение.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электропередачи сверхвысокого напряжения занимают особое место в современных электроэнергетических системах. Обладая большой пропускной способностью, они являются системообразующими линиями и повышают надежность и экономичность работы энергосистем. Кроме того, они являются мощными межсистемными связями, обеспечивая большие межсистемные перетоки мощности, повышая тем самым живучесть объединенной системы. От их надежной работы зависит жизнедеятельность регионов, а в случае отказов по тем или иным причинам, последствия выражаются многомиллионными убытками и серьезными социальными последствиями. Это подтверждается рядом системных аварий, имевших место как за рубежом, так и в России, и в Республике Таджикистан.

Одной из крупнейших гидроэлектростанций, как в Центральной Азии так и в Таджикистане, является Нурекская ГЭС. Она была построена в 1972 году в 75 километрах от столицы Таджикистана, а ее мощность составила 3000 МВт. Со времени запуска Нурекской ГЭС на ней произошло три аварии. Одна из них была очень тяжелой. Она случилась в 1983 году, однако результаты ее расследования засекретили. По мнению некоторых экспертов, авария была схожей с аварией, случившейся на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года.

Вторая авария случилось в 1999 году, в результате которой два распределительных устройства напряжением 500 и 220 кВ до настоящего времени находятся в аварийном состоянии.

И третья авария произошла 9 ноября 2009 года. В 04.30 утра по Московскому времени произошла самопроизвольная остановка агрегатов, оставившая без электроэнергии 70% территории страны в течение нескольких часов, что привело к большому экономическому ущербу для страны.

С увеличением в последние годы электропотребления перед правительством страны ставятся задачи строительства новых линий электропередачи 500 кВ для обеспечения электроэнергией крупных городов Республики Таджикистан. В связи с этим возникает проблема оценки уровня электромагнитных полей промышленной частоты линий электропередачи напряжением 500 кВ, с целью разработки комплекса мер по защите линейного персонала, обслуживающего эти линии а также населения, проживающего вблизи этих линий.

1.1 Общая характеристика воздушных линий напряжением 500 кВ Республики Таджикистан

В Республике Таджикистан имеются 4 обособленные энергетические системы: Южная (Душанбе – Вахшская) энергосистема; Северная энергосистема; Пенджикентские электрические сети в Согдийской области и электрические сети Горно – Бадахшанской автономной области. Южная энергосистема Душанбе – Вахш соединяется с Северным электрическим узлом Согдийской области через электрические сети Узбекистана. Прямое соединение между ними было запланировано путем строительства ЛЭП – 500 кВ, официальное начало которого было положено в сентябре 2006 года. Единственным собственным источником электропитания в Согдийской области является Кайраккумская ГЭС со среднегодовой выработкой электроэнергии 650 млн. кВт·час.

В национальной стратегии развития электроэнергетики Республики Таджикистан на период 2006 – 2015 годы приоритетными направлениями работы обозначены:

1. Завершение строительства начатых в 80 – х годах крупных гидроэлектростанций, а именно первой очереди Рогунской ГЭС, Сангтудинских ГЭС – 1 и ГЭС – 2;

2. Строительство ЛЭП – 500 кВ «Юг – Север» со строительством подстанций 500 кВ «Душанбе» и «Худжанд». Также рассматриваются варианты продолжения ЛЭП – 500 кВ «Юг-Север» по схеме: Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан);
3. Строительство ЛЭП – 500 кВ «Рогун – Сангтуда – Кундуз – Кабул - Пешавар».

На рисунке 1.1, показана карта схемы электрических сетей 220 – 500 кВ ОЭС Центральной Азии с перспективой до 2020 г. Красным цветом обозначены трассы сети линий электропередачи 500 кВ.

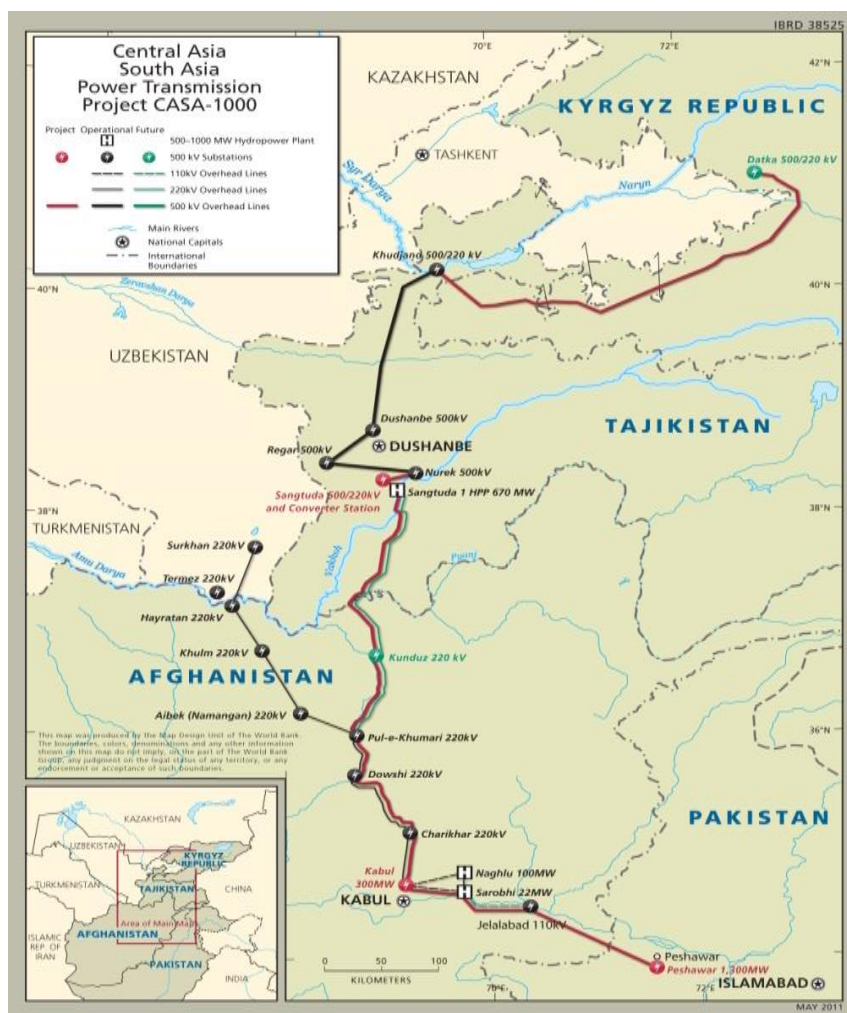


Рисунок 1.1 – Карта схемы электрических сетей 220 – 500 кВ ОЭС Центральной Азии с перспективой до 2020 г

Разработанная программа развития отраслей топливно-энергетического комплекса Республики Таджикистан на период 2006-2015 годов предусматривает продолжение реализации проектов по модернизации и реконструкции основных объектов энергосистемы, строительство новых гидроэлектростанций и развитие инфраструктуры в электроэнергетической отрасли. Проекты по модернизации гидроэлектростанций одновременно с реабилитацией предусматривают и увеличение мощности гидроагрегатов на 10%, что обеспечит увеличение установленной мощности гидроэлектростанций на 350 – 400 МВт. В рамках среднесрочной программы (2006 – 2012 гг.) предусмотрены работы по завершению строительства начатых ещё в 90 –е годы Сангтудинской ГЭС – 2 и первой очереди Рогунской ГЭС. С вводом первой очереди Рогунской ГЭС и Сангтудинской ГЭС – 2 и модернизации действующих гидроэлектростанций к 2013 году выработка электроэнергии в Республике Таджикистан достигнет 26,4 млрд. кВт·час. В 2013 году с завершением краткосрочной программы развития энергетической отрасли полностью решается вопрос энергетической безопасности Республики Таджикистан.

С целью обеспечения выдачи мощности строящихся гидроэлектростанций, а также экспорта летней избыточной электроэнергии, разработаны инвестиционные проекты по строительству ЛЭП – 500 кВ. Строительство ЛЭП – 500 кВ «Юг – Север» официально начато 15 сентября 2006 года и предполагается вести его вдоль автодороги «Душанбе – Худжанд». Протяжённость линии около 386 км. Стоимость ориентировочно составляет 282 млн. долл. США. Эта линия предназначена для передачи электроэнергии на север Таджикистана, наиболее энергодефицитного региона республики, с пропускной способностью – 1600 МВт. К концу 2009 г эта линия была успешна, введена в эксплуатацию. На рисунке 1.2, показана трасса прохождения ЛЭП-500 кВ «Юг – Север» по территории Республики Таджикистан.

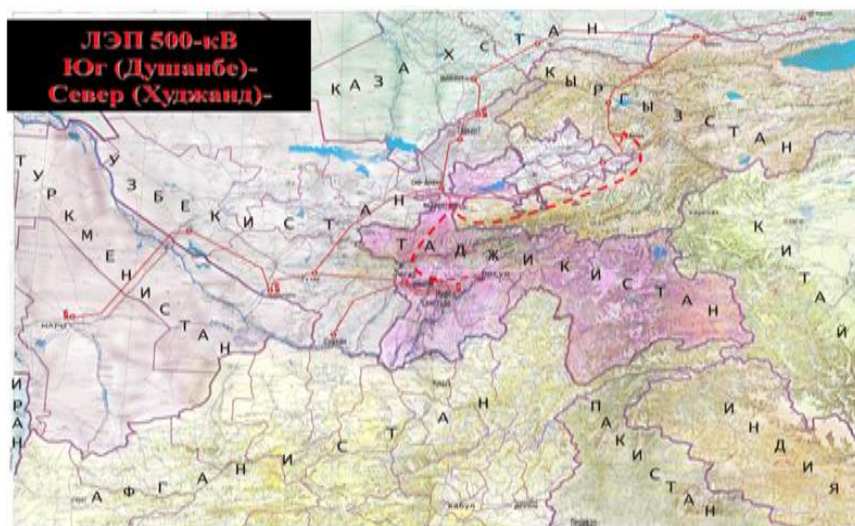


Рисунок 1.2 – Трасса прохождения ЛЭП-500 кВ «Юг – Север» по территории Республики Таджикистан

Прорабатываются варианты строительства ЛЭП – 500 кВ «Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан)», которая обеспечит передачу электроэнергии, вырабатываемую на гидроэлектростанциях Таджикистана и Кыргызстана в электродефицитные регионы Южного Казахстана.

На рисунке 1.3, показаны варианты трасс прохождения ЛЭП – 500 кВ «Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан)».

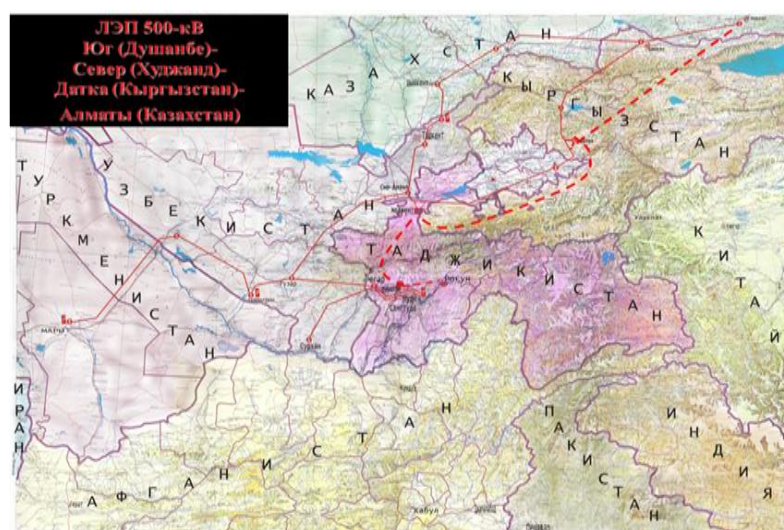


Рисунок 1.3 – Трасса прохождения ЛЭП – 500 кВ «Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан)»

В рамках проекта CASA – 1000 завершены работы по разработке ТЭО линии электропередачи «Таджикистан – Афганистан – Пакистан». В проекте предусматривается строительство ЛЭП – 500 кВ «Рогун – Сангтуда – Кундуз – Пули Хумри – Кабул – Пешавар (Пакистан)» и три преобразовательные станции. Протяженность линии – 750 км. На рисунке 1.4, показан проект, предусматривающий строительство ЛЭП – 500 кВ «Рогун – Сангтуда – Кундуз – Пули Хумри – Кабул – Пешавар (Пакистан)».



Рисунок 1.4 – Проект ЛЭП – 500 кВ «Рогун – Сангтуда – Кундуз – Пули Хумри – Кабул – Пешавар (Пакистан)»

В таблице 1.1, показаны существующие ЛЭП – 500 кВ, с указанием рельефа местности, марки и сечения, длины линий, температуры окружающей среды и пропускных способностей линий электропередачи напряжением 500 кВ.

Таблица 1.1 – Характеристика воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ Республики Таджикистан

Наименование	Марка и сечение проводов, мм ²	Длина, км	Ином по про-воду, А	Ином по т.т, А	Пропускная способность, МВт	Место прохождения линий 500 кВ	Рельеф местности	Температура, °С
Л – 505	3×АСО – 400 2×АСУС - 500	114,9 1,25	2475	2000	1515	п/ст Нурек – п/ст Регар – 500	Смешанный (пересеченный-горный)	от плюс 0,3 до плюс 45
Л – 506	3×АСО – 400 2×АСУС - 500	114,9 1,25	2475	2000	1515	п/ст Нурек – п/ст Регар – 500	Смешанный (пересеченный-горный)	от плюс 0,3 до плюс 45
Л – 507	3×АСО – 300	255	2070	2000	1150	п/ст Регар – 500 – п/ст Гузар Республики Узбекистан	Равнинный	от плюс 0,3 до плюс 45
Л – 508	3×АСО – 300	162,3	2190	2000	1150	п/ст Регар – 500 – п/ст Сурхан, Республики Узбекистан	Равнинный	от плюс 0,3 до плюс 45
Л – 517	3×АСО – 400	49,98	2475	2000	935	п/ст Регар – 500 – п/ст Душанбе – 500	Горный	от плюс 30 до минус 27
Л – 518	3×АСО – 400	213,5	2475	2000	935	п/ст Душанбе – 500 – п/ст Сугд – 500	Горный	от плюс 30 до минус 27

1.2 Проблемы, связанные с эксплуатацией линий напряжением 500 кВ

Линии электропередачи в Республики Таджикистан, как и любой другой объект электроэнергетики, нуждаются в обслуживании, которое осуществляется как при эксплуатации, так и при ведении ремонтных работ [95].

Таджикистан – горная страна. Около 93% его территории занимают горы – это 9/10 территории страны, при этом около половины территории лежит на высоте свыше 3000 метров. Абсолютные высотные отметки колеблются от 300 до 7495 метров над уровнем моря. На рисунке 1.5, представлена карта рельефа местности Таджикистана.



Рисунок 1.5 – Карта рельефа местности Республики Таджикистан

Характер горного рельефа не везде одинаков. На севере республики располагаются Ферганская долина и невысокий Кураминский хребет. Центральная часть республики – горные хребты Кухистана, которые играют важную климатообразующую роль для южных районов Таджикистана.

Юго-западная часть Таджикистана занята невысокими хребтами и широкими долинами. Равнины Таджикистана лежат на различной высоте над уровнем

моря – от 300 до 1000 м. Наиболее крупные равнины в Таджикистане – Западно-Ферганская, Пенджикентская, Кулябская, Гиссарская, Вахшская и Нижне-Кафирниганская.

Характерной особенностью территории Таджикистана являются засушливость климата, обилие тепла и значительная внутригодовая изменчивость практически всех климатических элементов.

Климат Таджикистана охватывает самые широкие диапазоны температур, влажности, характера выпадения осадков, интенсивности солнечной радиации. Среднегодовые температуры, в зависимости от высоты расположения местности, могут быть от плюс 17°C и более на юге страны и до минус 6°C и меньше на Памире. Максимум температуры наблюдается в июле, минимум в январе. Особенно суровым климатом отличается Восточный Памир, где абсолютный минимум достигает минус 63°C. На юге страны абсолютный максимум температур воздуха достигает плюс 47°C. В жарких низинных пустынях Южного Таджикистана и холодных высокогорных пустынях Восточного Памира среднегодовое количество осадков колеблется от 70 до 160 мм, тогда как максимум осадков наблюдается в Центральном Таджикистане и может превышать 1800 мм.

Общая продолжительность солнечного сияния колеблется от 2100 до 3170 часов в год. Наименьшая общая продолжительность солнечного сияния отмечена в горных районах, характеризующихся значительной облачностью в течение года. Наибольшая продолжительность солнечного сияния наблюдается в равнинных районах Северного Таджикистана, Гиссарской и Зеравшанской долинах, Юго – Западном Таджикистане и на Памире.

Облачность уменьшает приходящую солнечную радиацию и радиационный баланс. В целом за год облачность снижает поступление прямой радиации на 32 – 35 % от потенциально возможной для равнинной части и на 50% - для горной части. Максимальной интенсивности суммарная солнечная радиация достигает в мае-июле месяцах. Интенсивность суммарной радиации изменяется для предгорных районов от 280 до 925 МДж/м. В высокогорных районах она колеблется от 360 до 1120 МДж/м.

В связи с этим основные трудности при эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ обуславливаются рельефом местности и температурой окружающей среды.

Эксплуатацией воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ в республике занимается Открытая Акционерная Холдинговая Компания «Барки Точик» - национальная энергетическая компания Республики Таджикистан.

Прежде чем перейти к рассмотрению организации работ на линиях электропередачи напряжения 500 кВ приведем ряд определений, учет которых необходим для обеспечения безопасности не только линейного персонала, но и населения. При этом заметим, что нормативно-техническая документация, применяемая в Республики Таджикистан, идентична той, что используется в России.

Зоной влияния электрического поля называется пространство, в котором напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м [24, 74, 93].

Зоной экранирования называется пространство вблизи находящихся в электрическом поле зданий и сооружений, а также заземленных металлоконструкций фундаментов под оборудование, силовых трансформаторов и крупногабаритных объектов, в котором напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м [24, 25, 75, 93].

Выделяют **санитарно-защитную зону** воздушных линий, то есть территорию вдоль трассы воздушных линий, на границе которой напряженность электрического поля не превышает 1 кВ/м [10, 25, 74, 75].

В целях защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи (ВЛ), устанавливаются санитарные разрывы. Санитарный разрыв ВЛ устанавливается на территории вдоль трассы высоковольтной линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м [75].

Для вновь проектируемых ВЛ, а также зданий и сооружений допускается принимать границы санитарных разрывов вдоль трассы ВЛ с горизонтальным расположением проводов и без средств снижения напряженности электрического

поля по обе стороны от нее на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ВЛ [54, 75]:

- 20 м – для ВЛ напряжением 330 кВ;
- 30 м – для ВЛ напряжением 500 кВ;
- 40 м – для ВЛ напряжением 750 кВ;
- 55 м – для ВЛ напряжением 1150 кВ.

Считается, что за пределами этих границ напряженность электрического поля не превышает 1 кВ/м [73, 75].

Работы по техническому обслуживанию ВЛ выполняются электромонтерами подстанций (районных участков), за исключением выборочных осмотров и осмотров ВЛ после капитального ремонта, которые выполняются инженерно-техническими работниками. Перечень и сроки проведения работ (осмотры, проверки и измерения, выполнение отдельных видов работ по устранению мелких повреждений и неисправностей), выполняемых при техническом обслуживании ВЛ, приведены в [97].

Трасса ВЛ должна периодически расчищаться от кустарников и деревьев и содержаться в безопасном в пожарном отношении состоянии; должна поддерживаться установленная ширина просек и производиться обрезка деревьев [68]. Отдельные деревья, растущие вне просеки и угрожающие падением на провода и опоры ВЛ, должны быть вырублены.

Работы, связанные с верховым осмотром, проводятся 2 раза в год и, как правило, непродолжительны.

Работы по расчистке трасс в зоне отчуждения ЛЭП 500 кВ можно подразделить на ручную расчистку и механизированную расчистку трассы.

С учетом того, что в Республики Таджикистан линии электропередачи напряжением 500 кВ проходят, в основном, по горной местности, расчистка трассы ведется ручным способом и лишь на юге страны, где рельеф местности относительно ровный, работы по расчистке трасс частично ведутся с использованием механизированных приспособлений.

Механизированная расчистка трассы осуществляется бульдозерами Российского производства типа Т-170М1 и ДЭТ-250М2 [87].

Кроме того, согласно Правилам технического эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [68], при эксплуатации воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения должны быть организованы их периодические и внеочередные осмотры. Периодичность осмотров каждой воздушной линии по всей длине должна быть не реже 1 раз в год. Не реже 1 раза в год инженерно – техническим персоналом должны проводиться выборочные осмотры отдельных воздушных линий (или их участков), а все воздушные линии, подлежащие капитальному ремонту, должны быть осмотрены полностью.

Внеочередные осмотры воздушных линий или их участков должны производиться при образовании на проводах и тросах гололеда, при пляске проводов а также после стихийных бедствий.

Для проверки всех видов контактных соединений проводов и изоляторов воздушных линий электропередачи необходимо проводить тепловизионный контроль.

Тепловизионный контроль контактных соединений проводов ВЛ можно осуществлять двумя способами [12, 48, 55, 56, 66, 69, 103]:

- при пешем осмотре;
- с вертолета.

В настоящее время тепловизионный контроль контактных соединений проводов ВЛ проводится либо с нарушением технологии, либо не проводится вообще (из – за больших затрат на аренду вертолета) [8, 99].

Таким образом, вблизи воздушной линии электропередачи напряжением 500 кВ, как линейный персонал, так и определенная часть населения подвергаются воздействию различных вредных и опасных факторов [1, 2, 6, 34, 52, 53, 59, 91,92], одним из которых является ЭМП ПЧ.

Вредный производственный фактор – фактор среды и трудового процесса, воздействие которого на работающего при определенных условиях (интенсивность, длительность и др.) может вызвать профессиональное заболевание, вре-

менное или стойкое снижение работоспособности, повысить частоту соматических и инфекционных заболеваний, привести к нарушению здоровья потомства [23,71].

Опасный производственный фактор – фактор среды и трудового процесса, который может быть причиной острого заболевания или внезапного резкого ухудшения здоровья, смерти [23, 71].

Электрическое поле вблизи ВЛ может оказывать вредное воздействие на человека [15 – 19, 22, 26 – 28, 36, 37, 43, 45, 49, 67, 72, 83, 100]. Результаты этого воздействия приведены в [46, 70].

На настоящий момент нет единого сложившегося мнения о характере и степени воздействия электрического поля (ЭП) на организм человека [15, 21, 35, 42, 50, 106,109]. Большинство западных исследователей склонно считать влияние ЭП на человека незначительным. Результаты исследований, выполненных в первую очередь Ленинградским институтом охраны труда (ВНИИОТ, г. Ленинград), указывают на более высокую степень негативных изменений функционального состояния человеческого организма.

Если линейный персонал, обслуживающий линии электропередачи напряжением 500 кВ, подвергается воздействию электрического поля промышленной частоты при выполнении производственных обязанностей [40, 49, 55, 98, 102], то население подвергается воздействию электрических полей при строительстве малоэтажных жилых домов и ведении сельскохозяйственных работ в охранной зоне ВЛЭП 500 кВ. Подобное нарушение охранной зоны ВЛ 500 кВ и требований нормативно – технической документации обусловлено малым количеством земельных участков с ровным рельефом местности на всей территории Республики Таджикистан.

Из – за относительно малой численности линейного персонала каждый из работников, занятый обслуживанием ЛЭП напряжением 500 кВ, для выполнения необходимого объема работ вынужден находиться в зоне действия электромагнитного поля промышленной частоты в течение длительного времени, зачастую по 6 – 8 часов, а в летний период – до 10–12 часов в день.

Таким образом, линейный персонал, обслуживающий воздушные линии электропередачи 500 кВ, подвергается воздействию электромагнитного поля промышленной частоты, уровень которого превышает существующие нормативные значения [74, 93]. Напряжённость электрического и магнитного полей под линиями электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) имеет разнообразные значения [21, 35, 39, 44, 51, 60, 65, 100, 101, 110] и может изменяться в значительных пределах в зависимости от параметров окружающей среды [14, 64, 101].

1.3 Методы защиты персонала, занятого обслуживанием линий напряжением 500 кВ

Защита обслуживающего персонала от воздействия электрических полей, создаваемых линиями электропередачи напряжением 500 кВ, в Республике Таджикистан организуется по тем же нормам и правилам, что и в Российской Федерации, только не в полном объеме.

Нормативные требования к средствам и способам защиты от вредного воздействия электрического поля устанавливаются РД № 34.03.604 «Руководящие указания по защите персонала, обслуживающего распределительные устройства и воздушные линии электропередачи переменного тока напряжением 400, 500 и 750 кВ, от воздействия электрического поля» [70]; ГОСТом 12.4.154-85 «Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры»; ГОСТом 12.4.172-87 «Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования и методы контроля».

Согласно этим нормативным документам защита человека должна обеспечиваться как на этапе проектирования ОРУ и ВЛ, так и на этапе их эксплуатации.

При этом защитные мероприятия должны быть направлены на снижение напряженности электрического поля на рабочих местах до допустимых значений, сокращение продолжительности пребывания персонала в ОРУ при эксплуатационных и ремонтных работах и на исключение воздействия электрических разрядов (импульсного тока), возникающих при прикосновении человека к заземленным частям оборудования и конструкциям, или к изолированным от земли корпусам машин и механизмов (машины и механизмы на пневматическом ходу), а также тока (тока стекания), проходящего через человека, находящегося в контакте с изолированными от земли объектами – крупногабаритными предметами, машинами и механизмами, и на исключение возможности воспламенения горючих материалов и смесей.

Согласно [41, 74, 89] при обслуживании воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения в Российской Федерации применяются следующие средства и способы защиты персонала от воздействия электрических полей:

- средства индивидуальной защиты;
- увеличение высоты опор либо совершенствование конструкции ВЛ;
- тросовые экраны;
- экранирование древесно-кустарниковым массивом;
- приборы индивидуального учета уровня воздействия электрического поля промышленной частоты на организм человека;
- защита временем и др.

Ниже кратко рассмотрены данные средства и методы защиты.

На рисунке 1.6 представлен экранирующий комплект, предназначенный для индивидуальной защиты персонала при проведении различных видов работ по обслуживанию электроустановок в зоне действия электрического поля [41].



Рисунок 1.6 – Комплект экранирующий

Индивидуальные экранирующие комплекты, в зависимости от назначения, подразделяются на следующие:

- для работ на потенциале земли в ОРУ и ВЛ напряжением 330...1150 кВ при напряженности электрического поля не более 60 кВ/м;
- для работ на потенциале проводов (с непосредственным касанием проводов, находящихся под напряжением) ВЛ напряжением 110...1150 кВ.

Экранирующие комплекты должны обеспечивать комфортные условия труда (в гигиеническом отношении) при температуре окружающего воздуха в пределах от минус 25 до плюс 25°C [89] и не давать побочных явлений в виде покалывания и жжения. К сожалению, необходимо отметить, что с учетом температуры воздуха Таджикистана, в летний период достигающей плюс 45°C, основная масса работ по обслуживанию воздушных линий электропередачи (в частности, расчистка трасс линий в труднодоступной местности, где она ведется вручную, зача-

стую при повышенном уровне напряженности электрического поля) проводится без применения экранирующих комплектов.

Использование экранирующего комплекта в этом случае приводит к существенному дискомфорту у персонала и сильно ограничивает применение комплектов на практике.

Снижение напряженности электромагнитного поля под ВЛ СВН достигается путем увеличения высоты опор либо совершенствованием конструкций ВЛ, направленных на усиление взаимного экранирования проводов фаз [3, 5, 29, 31, 65]. Однако данный метод приводит к дополнительным капитальным затратам, связанным с увеличением металлических конструкций опор и поэтому не всегда может быть реализован.

В работах [32, 58, 99] рассматриваются возможности экранирования электрических полей с применением тросовых экранов: пассивных, активных и резонансных. Данный метод (также как и предыдущий) дорогостоящий, а также приводит к дополнительным потерям мощности.

Определенным экранирующим эффектом обладает древесно-кустарниковый массив, расположенный под проводами ВЛ [4, 38].

Проведенные в Санкт-Петербургском государственном техническом университете исследования [1], позволили установить изменения напряженности электрического поля при различных вариантах размещения деревьев и кустарников под ВЛ.

На сегодняшний день наиболее простой и эффективной защитой от воздействия электрического поля является ограничение времени пребывания в зоне действия. Согласно [89] защита временем проводится с помощью карт напряженности, которые составляются на основании измерений напряженности электрического поля на высоте 1,8 м приборами типа NFM1, ПЗ 50, ИНЭП 50 и т.д. Как известно напряженность электрического поля под линией не остается постоянной. Погодные условия существенно влияют на ее величину.

Поэтому карты распределения напряженности, построенные по результатам измерений, верны лишь на момент их снятия.

При этом карты распределения напряженности электрического поля строятся с шагом 5 м, что несколько искажает реальную картину распределения напряженности электрического поля и, кроме того, не учитываются изменения рельефа местности поперек пролетов ВЛ СВН.

По предварительным оценкам согласно [89, 102] большую часть работы на линиях можно проводить без дополнительных технических мероприятий по защите от электрического поля промышленной частоты при должной организации работы и учете времени, приведенного к нижней границе нормируемой напряженности (5 кВ/м).

Для этих целей на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета был разработан прибор учета воздействия электрического поля промышленной частоты ВЛ СВН [89] «Поле 10».

Функционально прибор состоит из головной части, которая размещается между каской и оголовьем, не нарушая конструктивную целостность каски, приемной части и USB модуля для беспроводного подключения приемной части к компьютеру с целью реализации учета времени, приведенного к нижней границе нормируемой напряженности. Подробно конструктивные особенности прибора «Поле 10» и принцип использования приведены в [89. 102].

В настоящее время данный прибор серийно не выпускается. Его применение осуществляется в тестовом режиме.

Выполненный краткий анализ методов защиты персонала, занятого обслуживанием линий напряжением 500 кВ, показывает, что применительно к условиям Республики Таджикистан наиболее приемлемым является способ защиты временем.

Однако для его реализации необходимо разработать иной подход, нежели тот, что заложен в разработанный на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета прибор учета приведенного времени.

1.4 Задачи исследования

В связи с развитием энергетики Таджикистана и эксплуатацией линий электропередачи напряжением 500 кВ возникла необходимость в разработке мероприятий по защите линейного персонала от воздействия различных вредных факторов, одним из которых является электрическое поле промышленной частоты.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Разработать методику построения распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль линии электропередачи 500 кВ с помощью вычислительного кластера, учитывающую топографию местности и температуру окружающего воздуха.

2. Оценить данные расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ, построенных по разработанной методике, сопоставив эти данные с результатами инструментальных исследований.

3. С использованием разработанной методики рассчитать распределения напряженности ЭП ПЧ для всех пролетов линии 500 кВ, проходящей по юго-западной части Республики Таджикистан, для различных температур окружающего воздуха.

4. На основании расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ разработать предложения по защите линейного персонала при ведении работ вдоль ВЛЭП 500 кВ.

ГЛАВА 2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 кВ

После отключения Республики Таджикистан от Единой энергетической системы перед правительством страны, в связи с увеличением в последние годы электропотребления, была поставлена задача строительства новых линий электропередачи 500 кВ для обеспечения электроэнергией крупных городов Республики Таджикистан.

Развитие сети магистральных воздушных линии электропередачи напряжения 500 кВ [82] в Республики Таджикистан привело к возникновению проблем, связанных с защитой обслуживающего персонала и населения, проживающего вблизи магистральных линий электропередачи сверхвысокого напряжения, от воздействия электрических полей и сопутствующих факторов.

Если линейный персонал, обслуживающий линии электропередачи напряжением 500 кВ, подвергается воздействию электрического поля промышленной частоты при выполнении производственных обязанностей [40, 49, 55, 98, 102], то население – при проживании и ведении сельскохозяйственных работ. Подобное нарушение охранной зоны ВЛ 500 кВ и требований нормативно – технической документации обусловлено малым количеством земельных участков с ровным рельефом местности на всей территории Республики Таджикистан.

Для определения комплекса защитных мероприятий необходимо знать распределение напряженности электрического поля вдоль соответствующей линии электропередачи. Это распределение в виде карт напряженности может быть построено на основании измерений напряженностей электрических полей [89]. Учитывая протяженность магистральных сетей, сделать это можно либо для наиболее характерных пролетов, либо для пролетов вблизи подстанций.

2.1 Анализ методик исследования распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ

Математическое описание электрической обстановки вдоль воздушных линий 500 кВ в целом не представляет больших трудностей, но при одном условии – наличии топографии той местности, где проходит ВЛЭП 500 кВ. При ее отсутствии результаты, полученные аналитическим путем, будут существенно отличаться от реальных.

Поэтому в настоящее время истинную картину распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ можно получить путем правильно организованных измерений [89]. Перед проведением измерений необходимо составить план размещения ВЛЭП 500 кВ с нанесенными на него точками измерений, в которых будут фиксироваться напряженности электрических полей. Результаты измерений должны быть оформлены в виде протокола или карты распределения уровней напряженности электрических полей, совмещенного с планом размещения ВЛЭП 500 кВ [89]. Оформление результатов измерений электрического поля в виде карт обеспечит наглядность и удобство в последующем анализе.

Согласно [89], анализ напряженности электрического поля ВЛЭП 500 кВ должен быть произведен на определенных пролетах ВЛЭП 500 кВ. Выбор пролетов ВЛЭП 500 кВ, на которых необходимо выполнить измерения, можно проводить по документации, разрабатываемой при строительстве ВЛЭП. Данная документация содержит сведения о рельефе местности, типе опор, растительности, окружающей ВЛЭП, переходе ВЛЭП через реки или другие естественные препятствия. С помощью этой документации можно выбрать как наиболее характерные для данной местности пролеты ВЛЭП, так и существенно выделяющиеся. Измерения уровней электрического поля должны в обязательном порядке производиться как для первых, так и для вторых.

В работах [21, 77, 86, 89, 94] приводятся методики составления карт распределения напряженности электрических полей вдоль линий электропередач и на территории подстанции напряжением 500 кВ с учетом рельефа местности и температуры воздуха, основанные на проведении измерений следующим образом:

1. В отдельных точках, наиболее характеризующих поле вдоль ВЛЭП.
2. В узлах регулярной сетки с регулярным шагом, ячейки которой могут являться любым многоугольником.
3. От центра установленного оборудования или от точек с максимальными напряженностями ЭП, определенными по конструктивным особенностям установленного оборудования, двигаются по радиальной схеме в восьми направлениях с шагом между лучами в 45° .

На рисунках 2.1а, б, показаны схемы измерения напряженностей электрических полей под линиям электропередач, приведенные в работах [21, 89, 94].

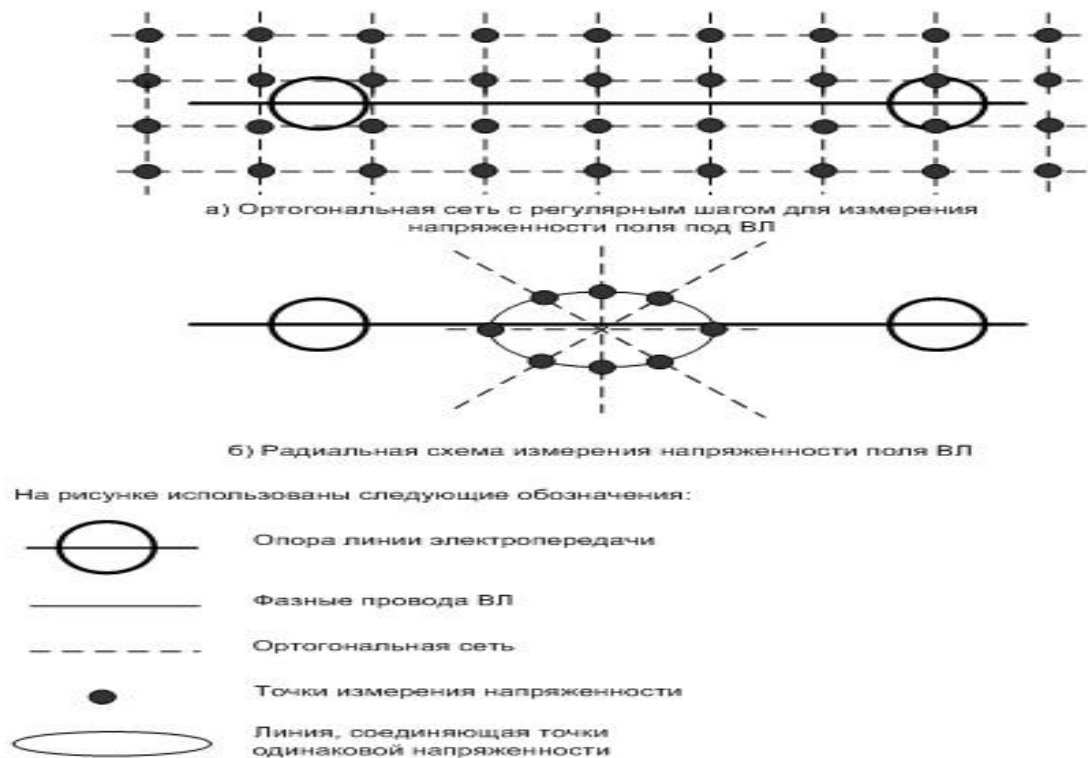


Рисунок 2.1 –Схемы измерения напряженности электрического поля ВЛЭП 500 кВ

Построение карт на основе первого способа не отражает истинной картины и может создавать ошибочное представление о реальном распределении напряженностей электромагнитного поля.

Второй способ применяется при построении карт напряженностей вдоль ВЛЭП, работающих в нормальном режиме. К недостатком данного способа можно отнести трудоемкость проводимых измерений, так как для получения карты поля, согласно этой методике, требуется большое количество точек измерений.

Третий способ разрабатывался для построения карт напряженностей резко неоднородных полей. Например, для составления карты поля открытого распределительного устройства.

Учитывая что линии электропередачи напряжением 500 кВ проходят в северной части Таджикистана по местности, где возвышения над уровнем моря имеют отметки от 1500 м до 2500 м, а в юго – западной – до 1000 м с годовым ходом температуры воздуха вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ, проходящий по северной части территории, в пределах от 30°C до минус 24°C, а на юго – западе – в пределах от плюс 45°C до плюс 0,3°C, проведение натуральных измерений затруднено.

2.2 Методика исследования электрического поля применительно к условиям Республики Таджикистан

В главе 1 было показано, что рельеф местности вдоль трасс ВЛЭП 500 кВ, проходящих по территории Республики Таджикистан, сложный, что делает расчет электрического поля вдоль этих линий традиционными методами не эффективным [33, 46, 47, 57].

Одним из факторов, влияющих на точность расчетов, является математическое описание «геометрии» ВЛЭП. Большинство методов расчета электрического

поля вдоль ВЛЭП разработаны для ровной местности, что не соответствует реальным условиям трасс ВЛЭП 500 кВ.

Наиболее распространенным является прием, применяемый как за рубежом, так и в России [3, 9], основанный на замене реальных проводов бесконечно длинными горизонтальными прямыми, расположенными на высоте:

$$H_{\text{ср}} = H - \frac{1}{2} \cdot f, \quad (2.1)$$

где H – высота подвеса, м;

f – стрела провеса провода, м.

При расчетах напряженности электрического поля, создаваемого зарядами, распределенными на поверхности провода, в качестве математической модели для анализа провисания проводов можно использовать уравнение идеально гибкой нити:

$$y = y_{\text{max}} \cdot \text{ch}\left(\frac{x}{y_{\text{max}}}\right), \quad (2.2)$$

где y_{max} – величина, характеризующая собой точку максимального провеса провода, м;

x/y – координаты абсциссы и ординаты от опор, м.

Уравнение (2.2) можно разложить в функциональный ряд Маклорена:

$$y = y_{\text{max}} \cdot \text{ch}\left(\frac{x}{y_{\text{max}}}\right) = \left[1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{y_{\text{max}}}\right)^2 + \frac{1}{4!} \cdot \left(\frac{x}{y_{\text{max}}}\right)^4 + \dots + \frac{1}{(2n)!} \cdot \left(\frac{x}{y_{\text{max}}}\right)^{2n} \right], \quad (2.3)$$

Из свойств гибкой нити следует:

для низшей точки провисания провода или троса:

$$\sigma_0 = y_{\text{max}} \cdot \gamma, \quad (2.4)$$

где σ_0 – механическое напряжение в низшей точке провода, Н/мм²;

γ – удельная нагрузка провода, Н/(м·мм²).

Учитывая, что в справочниках и каталогах опор указывается нормированная габаритная высота до земли с учетом рельефа местности вдоль пролета ВЛЭП, можно принять $u_{max} = h_{\Gamma}$, и в дальнейшем использовать h_{Γ} .

где h_{Γ} – габаритная высота провеса провода над землей, м.

При разной высоте точек подвеса (рисунок 2.2 а, б) определяем значение эквивалентных пролетов:

$$l_{\text{э}} = l + \frac{2\sigma}{\gamma} \cdot \frac{\Delta h}{l}; \quad l'_{\text{э}} = l - \frac{2\sigma}{\gamma} \cdot \frac{\Delta h}{l}, \quad (2.5)$$

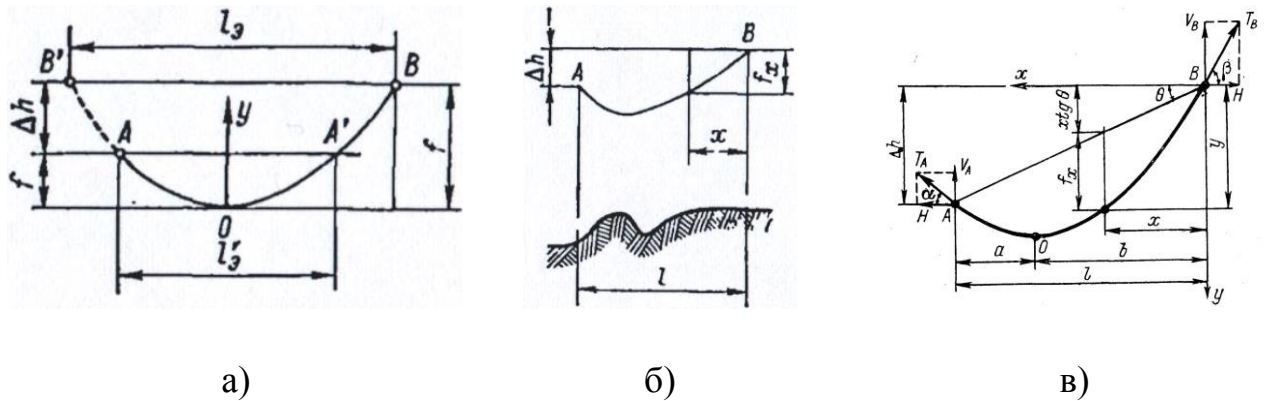


Рисунок 2.2 – Кривые провисания и стрелы провеса проводов

Соответствующие стрелы провеса в точке А и В определяем по формулам:

$$f_B = \frac{l_{\text{э}}^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \sigma}; \quad f_A = \frac{(l'_{\text{э}})^2 \cdot \gamma}{8\sigma}, \quad (2.6)$$

Стрела провеса в любой точке пролета (рис.2.2,б)

$$f_x = \frac{\gamma \cdot X}{2 \cdot \sigma} \cdot (l - X) + X \cdot \frac{\Delta h}{l}, \quad (2.7)$$

где X – расстояние от рассматриваемой точки до опоры, м;

σ_0 и σ – напряжение в низшей точке провода в начальном и искомом состояниях, кГ/мм² определяем по [72].

Напряжение в точках подвеса (рис.2.2,а)

$$\sigma_A = \sigma_0 + \gamma \cdot f_A; \sigma_B = \sigma_0 + \gamma \cdot f_B. \quad (2.8)$$

При расчетах электрических полей вдоль пролета ВЛЭП для различных рельефов местности главной задачей является определение максимальной стрелы провеса, где значения напряженности электрического поля будут иметь максимальную величину. В этих случаях бывает известна высота точек А и В подвеса провода на опорах, а высота низшей точки кривой провисания О неизвестна. В таких расчетах удобнее принять систему координат с началом в точке В и направлением осей x и y , показанным на (рисунке 2.2,в).

Переходя к новой системе координат по известным из математики формулам [3, 33] получаем

$$y = \frac{\gamma \cdot X}{2 \cdot \sigma} \cdot (l - X) + \frac{\Delta h}{l}, \quad (2.9)$$

$$f_x = \frac{\gamma \cdot X}{2 \cdot \sigma} \cdot (l - x), \quad (2.10)$$

Это выражение определяет стрелу провеса на любом расстоянии x от высшей точки подвеса.

Автором [9, 11] предлагается методика расчета напряженности электрического поля, учитывающая провисание провода без знания стрелы провеса, однако данная методика более применима для пролетов ВЛЭП, проходящих по ровной местности.

При проектном размещении опор по профилю трассы и значительной длине линии используется графический метод [3]. При этом методе применяется специальный шаблон, представляющий собой кривые (параболы), соответствующие кривой максимального провисания провода и расположенные одна за другой не более 3 – х кривых. Интервалы сдвига определяются нормируемыми расстояниями от провода до поверхности земли [3, 5] и активной высотой опор на данном участке ВЛЭП.

Построение кривой шаблона выполняется по уравнению параболы:

$$y = k \cdot X^2, \quad (2.11)$$

где – $X=0,5 \cdot l_p$ – переменная величина, представляющая собой длину полу-пролета провода, м;

$k = \gamma_p/2 \cdot \sigma_p$ – постоянная шаблона для каждого расчетного пролета и марки провода, γ_p и σ_p берутся для того режима, который дал наибольшую стрелу провеса.

Постоянную шаблона в выражении (2.11) можно определить, анализируя выражение, приведенное в [3, 5] в виде:

$$y = y_{max} + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{y_{max}}, \quad (2.12)$$

Приняв в нем $y_{max} = h_\Gamma$, можно получить

$$y = h_\Gamma + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{h_\Gamma}, \quad (2.13)$$

Сравнивая (2.11) и (2.13), находим

$$k = \frac{h_\Gamma}{x^2} + \frac{1}{2 \cdot h_\Gamma}, \quad (2.14)$$

По полученному выражению можно строить кривые шаблона. Шаблоны представляют собой три одинаковые кривые, смещенные по вертикали оси [3].

Используя кривые шаблона можно определить наименьший габарит провеса провода над землей. Зная наименьший габарит провеса провода над землей, можно определить значения напряженности электрического поля, создаваемого ВЛЭП напряжением 500 кВ, для характерных участков применительно к условиям Республики Таджикистан.

Если расстояние от провода до земли известно, то с помощью метода зеркальных отображений можно рассчитать напряженность в каждой точке на высоте 1,8 м над уровнем земли. Высота размещения провода над землей (H) принимается равной фактической высоте размещения участка (точки) провода, ближайшего к точке P (рисунок 2.3), поскольку на формирование поля в этой точке основное влияние оказывает ближайший участок провода.

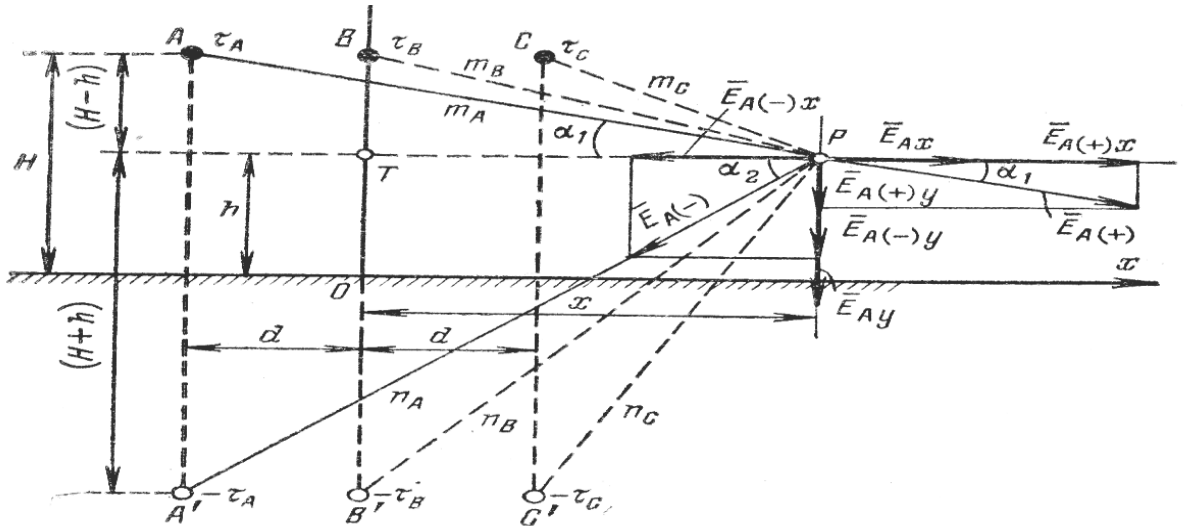


Рисунок 2.3 – К вычислению напряженности электрического поля вблизи воздушной линии электропередачи в точке P

Если расположение проводов горизонтальное, т.е. кратчайшие расстояния от каждого провода до поверхности земли равны, то

$$C_A = C_B = C_C = C.$$

Для симметричной трехфазной системы искомая напряженность трехфазной воздушной линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов будет, В/м [33]:

$$E = \frac{C \cdot U_{\phi}}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sqrt{(2 \cdot K_1 - K_3 - K_5)^2 + 3 \cdot (K_3 - K_5)^2 + (2 \cdot K_2 - K_4 - K_6)^2 + 3 \cdot (K_4 - K_6)^2}, \quad (2.15)$$

где

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \left(\frac{2 \cdot H_{cp} \cdot d}{r_{\text{экв}} \cdot \sqrt[3]{(4H_{cp}^2 + d^2)} \cdot \sqrt{H_{cp}^2 + d^2}} \right)}, \quad (2.16)$$

$$K_1 = \frac{x + d}{m_A^2} - \frac{x + d}{n_A^2}, \quad (2.17)$$

$$K_2 = \frac{H - h}{m_A^2} + \frac{H + h}{n_A^2}, \quad (2.18)$$

$$K_3 = \frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2}, \quad (2.19)$$

$$K_4 = \frac{H - h}{m_B^2} + \frac{H + h}{n_B^2}, \quad (2.20)$$

$$K_5 = \frac{x - d}{m_C^2} - \frac{x - d}{n_C^2}, \quad (2.21)$$

$$K_6 = \frac{H - h}{m_C^2} + \frac{H + h}{n_C^2}, \quad (2.22)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ электрическая постоянная, Ф/м;

m – кратчайшее расстояние от провода до точки, в которой определялась напряженность, м;

n – кратчайшее расстояние от зеркального отображения провода до точки, в которой определялась напряженность, м;

h – высота, на которой проводятся измерения, м;

H – высота провода над землей, м;

d – расстояние между проводами, м;

U_ϕ – фазное напряжение линии, В;

H_{cp} – среднее расстояние от провода до поверхности земли, м.

В сетях номинальным напряжением 500 кВ и выше для снижения значения напряженности на поверхности провода применяют расщепление фаз. При расщепленных фазах, состоящих каждая из n проводников радиусом r_0 , м; с расстоянием между ними a (шаг расщепления), м, эквивалентный радиус $r_{\text{ЭКВ}}$, м может быть вычислен:

$$r_{\text{ЭКВ}} = P \cdot \sqrt[n]{r_0 \cdot a^{n-1}}, \quad (2.23)$$

где P – поправочный коэффициент (при $n=2$ и $n=3$, коэффициент $P=1$, а при $n=4$ $P=1,09$).

Апробация данной методики исследования электрического поля для отдельных участков представлена в следующем параграфе.

2.3 Апробация методики на отдельных участках ВЛ, аналогичных условиям Республики Таджикистан

Для оценки достоверности результатов расчета напряженностей электрического поля, полученных по методу зеркальных отображений, рассмотренной в 2.2, были подобраны участки ВЛЭП 500 кВ, на которых ранее проводились измерения напряженности электрического поля [89]. Расчет проводился для тех же температурных условий, что были во время производства измерений.

Для участка пролета (подъем линии в гору) по формулам (2.15 – 2.22) рассчитываем напряженность электрического поля. Расчет производится для одной из точек в которой были произведены замеры электрических полей. Результаты расчетов по другим участкам приведены в таблицах 2.1 – 2.2.

Исходные данные:

- пролет линии $L=350$ м;
- расстояние от опоры до точки измерения $X=180$ м.

С учетом того что, при подъёме линии в гору опоры размещаются на разных высотах, их разность определялась по выражению:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 469,67 - 460 = 9,67 \text{ м}, \quad (2.24)$$

где h_1, h_2 – отметки среднего профиля между опорами пролета (подъем линии в гору).

Стрелу провеса провода в любой точке определяем по формуле (2.7):

$$f_x = \frac{4,498 \cdot 10^{-3} \cdot 180}{2 \cdot 12,25} \cdot (350 - 180) + 180 \cdot \frac{9,67}{350} = 10,59 \text{ м}$$

Высота размещения провода над землей H должна приниматься равной фактической высоте размещения участка (точки) провода, ближайшего к P – поправочному коэффициенту, поскольку на формирование поля в этой точке основное влияние оказывает ближайший участок провода. Эта высота, м, определяется из следующего формулы:

$$H = H_{\Pi} - \frac{4f_x \cdot X}{L} \left(1 - \frac{X}{L}\right) = 22 - \frac{4 \cdot 10,59 \cdot 180}{350} \left(1 - \frac{180}{350}\right) = 11,42 \text{ м}, \quad (2.25)$$

где H_{Π} – высота крепления проводов на опоре, м;

X – расстояние от опоры до точки замера электрического поля, м.

Емкость фазы трехфазной линии с горизонтальным расположением проводов относительно земли на единицу длины линии, $\Phi/\text{м}$, определяем по формуле (2.15):

$$C = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-3}}{\ln \left(\frac{2 \cdot 15 \cdot 10,5}{0,1341 \cdot \sqrt[3]{(4 \cdot 15^2 + 10,5^2)} \cdot \sqrt{15^2 + 10,5^2}} \right)} = 12,4 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$$

где H_{cp} – средняя высота подвеса провода над поверхностью земли, м:

$$H_{cp} = H_{\Pi} - \frac{2 \cdot f_x}{3} = 22 - \frac{2 \cdot 10,59}{3} = 14,94 \approx 15 \text{ м}, \quad (2.26)$$

По формуле (2.15) находим напряженность поля в точке $X=180$ м от опоры. Высоту размещения провода над землей H принимаем равной согласно полученному значению в формуле $H=11,42$ м. Это обусловлено тем, что при расстановке опор в данном пролете с учетом разности высот точка расчета $X=180$ м находится на высоте габаритного провеса.

Кратчайшее расстояние от провода до точки m и его зеркальное отображение n , где определяется напряжённость электрического поля, определяем из выражений:

$$m_A = \sqrt{(x + d)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(0 + 10,5)^2 + (11,42 - 1,8)^2} = 14,24 \text{ м}, \quad (2.27)$$

$$n_A = \sqrt{(x + d)^2 + (H + h)^2} = \sqrt{(0 + 10,5)^2 + (11,42 + 1,8)^2} = 16,88 \text{ м}, \quad (2.28)$$

$$m_B = \sqrt{(x)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(0)^2 + (11,42 - 1,8)^2} = 9,62 \text{ м}, \quad (2.29)$$

$$n_B = \sqrt{(x)^2 + (H + h)^2} = \sqrt{(0)^2 + (11,42 + 1,8)^2} = 13,22 \text{ м}, \quad (2.30)$$

$$m_C = \sqrt{(x - d)^2 + (H - h)^2} = \sqrt{(0 - 10,5)^2 + (11,42 - 1,8)^2} = 14,24 \text{ м}, \quad (2.31)$$

$$n_C = \sqrt{(x - d)^2 + (H + h)^2} = \sqrt{(0 + 10,5)^2 + (11,42 + 1,8)^2} = 16,88 \text{ м}. \quad (2.32)$$

По формулам (2.16 – 2.21) рассчитываем коэффициенты K :

$$K_1 = \frac{10,5}{14,24^2} - \frac{10,5}{16,88^2} = 0,015$$

$$K_2 = \frac{11,42 - 1,8}{14,24^2} + \frac{11,42 + 1,8}{16,88^2} = 0,094$$

$$K_3 = 0$$

$$K_4 = \frac{11,42 - 1,8}{9,62^2} + \frac{11,42 + 1,8}{13,22^2} = 0,18$$

$$K_5 = \frac{-10,5}{14,24^2} - \frac{-10,5}{16,88^2} = -0,015$$

$$K_6 = \frac{11,42 - 1,8}{14,24^2} + \frac{11,42 + 1,8}{16,88^2} = 0,094$$

Подставив численные значения величин, входящих в формулу (2.15), определяем напряженность электрического поля под средней фазой в точке с $X=180$ м от опоры.

$$E = \frac{12,4 \cdot 10^{-12} \cdot 289 \cdot 10^3}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \sqrt{(2 \cdot 0,015 - 0 + 0,015)^2 + 3 \cdot (0 + 0,015)^2 + (2 \cdot 0,094 - 0,18 - 0,094)^2 + 3 \cdot (0,18 - 0,094)^2} =$$

$$= 5,768 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

По полученному значению можно оценить расхождение расчетного значения с измеренными значениями, полученными сотрудниками кафедры «Безопас-

ности жизнедеятельности» ЮУрГУ. Для данной точки при $X=180$ м от опоры под средней фазой, где проводилось измерение, значение напряженности ЭП составило 10,5 кВ/м. Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{E_{\text{из}}} = \frac{E_p - E_{\text{из}}}{E_{\text{из}}} \cdot 100\% = \frac{5,768 - 10,5}{10,5} \cdot 100\% = 45,1\%, \quad (2.33)$$

где E_p – расчетное значение напряженности ЭП, кВ/м;

$E_{\text{из}}$ – измеренное значение напряженности ЭП, кВ/м.

Сопоставления расчетных значений напряженности электрического поля, полученных с использованием метода зеркальных отображений, под пролётами ВЛ 500 кВ (подъём линии в гору и пересеченный рельеф местности) с измеренными значениями данных пролетов приведены в таблицах 2.1 – 2.2.

Таблица 2.1 – Расчетные и измеренные значения напряженности ЭП (пересеченный рельеф местности)

Расстояния между опорами, м	10 м от фазы С	6 м от фазы С	3 м от фазы С	под крайней фазой С	между фазами В и С	под средней фазой В	между фазами А и В	под крайней фазой А	3 м от фазы А	6 м от фазы А	10 м от фазы А
40	2,60 (2,45)	2,90 (2,80)	2,90 (5,00)	2,70 (5,05)	1,93 (3,30)	1,37 (3,00)	1,93 (3,70)	2,70 (4,20)	2,90 (4,30)	2,90 (3,50)	2,60 (3,50)
50	2,70 (3,00)	3,05 (4,20)	3,07 (5,30)	2,86 (5,00)	2,05 (4,10)	1,48 (2,80)	2,05 (2,70)	2,86 (3,50)	3,07 (3,90)	3,05 (3,30)	2,70 (2,95)
60	2,84 (4,00)	3,16 (4,65)	3,20 (8,30)	2,99 (8,00)	2,16 (3,30)	1,57 (3,00)	2,16 (3,00)	2,99 (4,40)	3,20 (4,45)	3,16 (3,90)	2,84 (4,00)
70	2,90 (3,30)	3,34 (3,90)	3,4 (4,10)	3,19 (3,60)	2,32 (2,55)	1,71 (3,90)	2,32 (3,65)	3,19 (8,00)	3,40 (4,20)	3,34 (3,30)	2,90 (2,70)
80	2,98 (2,45)	3,36 (3,45)	3,43 (3,30)	3,23 (4,95)	2,35 (3,70)	1,73 (3,30)	2,35 (3,00)	3,23 (3,70)	3,43 (4,00)	3,36 (3,00)	2,98 (2,45)
90	3,03 (3,30)	3,44 (4,45)	3,52 (7,70)	3,32 (8,30)	2,42 (4,45)	1,80 (5,3)	2,42 (4,45)	3,32 (5,90)	3,52 (8,30)	3,44 (4,90)	3,03 (3,00)
100	3,07 (3,30)	3,94 (5,30)	3,58 (4,45)	3,38 (4,96)	2,47 (4,00)	1,84 (4,30)	2,47 (3,90)	3,38 (5,70)	3,58 (4,70)	3,94 (5,70)	3,07 (2,70)
110	3,07 (3,30)	3,50 (3,65)	3,59 (4,30)	3,39 (5,10)	2,47 (3,90)	1,85 (4,10)	2,47 (4,95)	3,39 (4,50)	3,59 (4,50)	3,50 (3,30)	3,07 (2,55)
120	3,07 (2,10)	3,50 (3,40)	3,59 (3,65)	3,39 (3,40)	2,48 (3,40)	1,85 (3,30)	2,48 (4,30)	3,39 (3,90)	3,59 (3,60)	3,50 (3,50)	3,07 (3,40)

Примечание – в скобка приведены значения напряженности электрического поля, полученные при измерениях, проводившихся сотрудниками кафедры «БЖД ЮУрГУ».

Таблица 2.2 – Расчетные и измеренные значения напряженности ЭП (подъём линии в гору)

Расстояния между опорами, м	10 м от фазы С	5 м от фазы С	под крайней фазой С	между фазами В и С	под средней фазой В	между фазами А и В	под крайней фазой А	5 м от фазы А	10 м от фазы А
80	3,10 (5,50)	3,60 (9,00)	3,44 (10,50)	2,50 (4,90)	1,88 (3,90)	2,50 (4,00)	3,44 (9,00)	3,60 (5,50)	3,10 (2,10)
100	3,40 (0,00)	4,12 (2,60)	4,03 (9,00)	2,98 (8,00)	2,33 (5,00)	2,98 (4,90)	4,03 (10,00)	4,12 (8,50)	3,40 (3,50)
120	3,70 (2,00)	4,78 (3,30)	4,8 (11,00)	3,63 (9,00)	2,98 (9,00)	3,63 (5,50)	4,80 (11,50)	4,78 (10,50)	3,70 (4,85)
140	4,06 (4,80)	5,50 (12,50)	5,77 (14,50)	4,35 (9,00)	3,77 (9,50)	4,35 (9,00)	5,77 (13,00)	5,50 (10,50)	4,06 (4,50)
160	4,33 (8,00)	6,25 (12,50)	6,80 (12,50)	5,14 (9,00)	4,74 (9,00)	5,14 (9,00)	6,80 (13,00)	6,25 (11,00)	4,33 (5,40)
180	4,53 (9,50)	6,96 (11,50)	7,90 (12,50)	5,90 (9,00)	5,77 (10,50)	5,90 (5,48)	7,90 (12,50)	6,96 (11,00)	4,53 (8,40)
200	4,66 (5,50)	7,50 (11,00)	8,86 (11,50)	6,52 (10,00)	6,68 (8,50)	6,52 (8,85)	8,86 (11,90)	7,50 (3,25)	4,66 (-)
220	4,68 (8,00)	7,59 (11,50)	8,99 (13,00)	6,60 (11,00)	6,81 (11,00)	6,60 (10,00)	8,99 (14,90)	7,59 (11,00)	4,68 (10,00)
240	4,62 (8,50)	7,29 (12,00)	8,47 (13,50)	6,27 (9,50)	6,29 (10,50)	6,27 (8,00)	8,47 (12,50)	7,29 (9,50)	4,62 (2,70)
260	4,55 (4,90)	6,93 (9,00)	7,86 (12,00)	5,86 (9,00)	5,69 (5,00)	5,86 (5,30)	7,86 (11,00)	6,93 (9,00)	4,55 (4,00)
280	4,35 (5,00)	6,22 (9,00)	6,75 (9,50)	5,08 (8,00)	4,65 (4,20)	5,08 (4,30)	6,75 (4,50)	6,22 (3,75)	4,35 (1,60)

Примечание – в скобка приведены значения напряженности электрического поля, полученные при измерениях, проводившихся сотрудниками кафедры «БЖД ЮУрГУ».

Считая экспериментальные данные истинными, оценим погрешность расчетных значений для одних и тех же точек определения напряженности электрического поля промышленной частоты.

Изменения относительной погрешности в зависимости от места измерения представлены на рисунках 2.4 – 2.5.

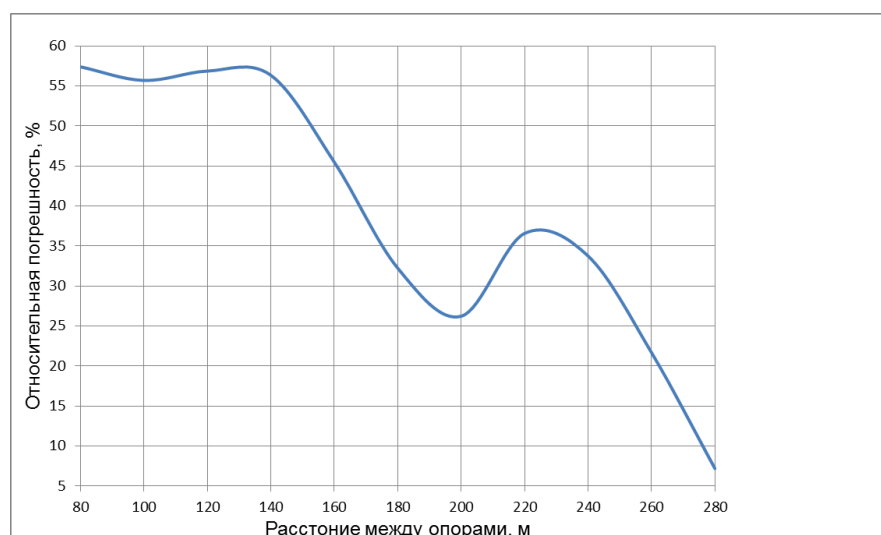


Рисунок 2.4 – Зависимость относительной погрешности расчетных данных, полученных методом зеркальных отображений, от измеренных значений (подъем линии в гору)

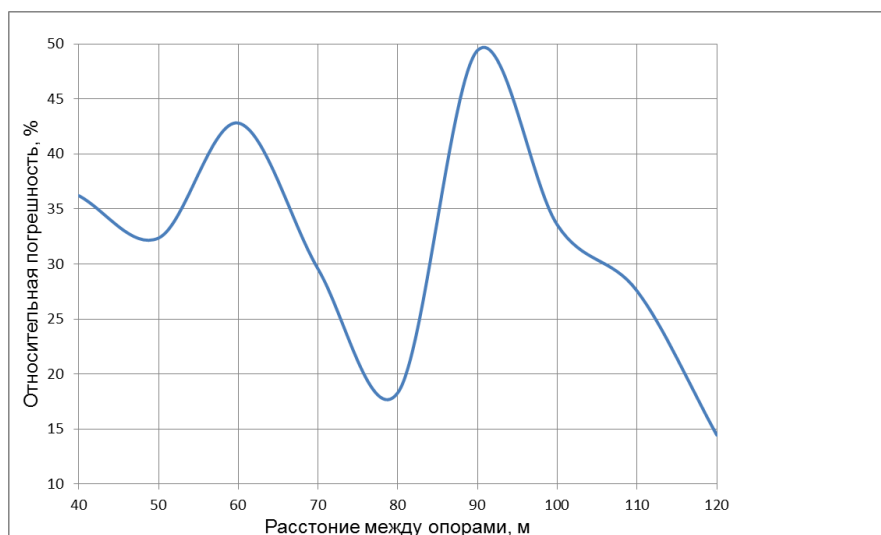


Рисунок 2.5 – Зависимость относительной погрешности расчетных данных, полученных методом зеркальных отображений, от измеренных значений (пересеченный рельеф местности)

Согласно рисункам 2.4 – 2.5 относительная погрешность расчетных значений, полученных методом зеркальных отображений, лежит в диапазоне от 7 до 57,5%. Причем минимальное значение погрешности обеспечивается на весьма малом участке пролета.

Отмеченные особенности позволяют сделать вывод, что применение общепринятых методов расчета распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ [33] приведёт к значительным погрешностям, а проведение измерений по методикам [89] для заявленных целей, с учетом условий применения приборов, будет ограничиваться периодом возможных измерений и сопровождаться большими трудозатратами.

2.4 Выводы

1. Выполнен анализ методик измерения напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ, по полученным данным которых строятся карты распределения напряженности ЭП ПЧ.

2. Было установлено, что применение данных методов измерения для исследования распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ, проходящих по территории Республики Таджикистан, не эффективно в связи со сложным рельефом местности и большим разнообразием температур окружающего воздуха.

3. Рассмотрено применение аналитического метода расчета напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ методом зеркального отображения в условиях Республики Таджикистан.

4. Апробация данного метода показала, что при использовании данного метода для определения значения напряженности ЭП ПЧ для пролетов с пересеченным рельефом местности и при подъеме линии в гору относительная погрешность лежит в диапазонах от 7 до 57,5 %.

ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ВЛЭП 500 кВ

Как было показано в главе 1, на линейный персонал, занятый обслуживанием ВЛЭП 500 кВ, действует целый ряд вредных факторов [1, 2, 6, 34, 52, 53, 59, 91,92]. Наиболее значимым из них является напряженность ЭП промышленной частоты. Для снижения риска повреждения здоровья линейного персонала от воздействия этого вредного фактора, необходимо не только исследовать саму напряженность ЭП и оценить в каких пределах и в зависимости от каких факторов она изменяется, но и обеспечить, по возможности, минимальную экспозицию (продолжительность и интенсивность вредного фактора) нахождения персонала в зоне действия ЭП. Это можно достичь с помощью карт распределения напряженности ЭП вдоль линии электропередачи 500 кВ, учитывающих как рельеф местности, так и температуру окружающей среды [79, 81, 88, 96, 102].

3.1 Анализ методов расчета напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ

Электрические поля установок высокого напряжения – поля промышленной частоты (50 Гц). Известно, что длина волны электромагнитного поля такой частоты составляет $\lambda = c/f = 6 \cdot 10^6$ м или $\lambda = 6000$ км.

где c – скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

f – частота, $f=50$ Гц.

Таким образом, поле, создаваемое ВЛ, является электромагнитным на расстоянии от линии не менее 6000 км [7, 30]. Ясно, что изучение влияния такого по-

ля на организм человека лишено практического смысла. Обслуживающий персонал в процессе своей деятельности находится на расстоянии приблизительно от $6 - 7$ до 60 метров от источника поля – проводов линии, что на 5 или 6 порядков меньше длины волны. При таких условиях электрическую и магнитную составляющую поля можно рассматривать независимо друг от друга, причем указанная особенность относится не только к частоте 50 Гц, но и, как отмечается в [7, 30], к частотам вплоть до 100 кГц.

Это позволяет рассматривать поля промышленной частоты как квазистатические и описывать их, подобно электростатическим, уравнениями Пуассона [7, 30, 33, 46, 47]:

$$\operatorname{div}(\varepsilon\varepsilon_0 \times \operatorname{grad}(\varphi)) = -\rho, \quad (3.1)$$

или Лапласа

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}(\varphi)) = 0, \quad (3.2)$$

где ε —относительная проницаемость среды, Ф/м;

ε_0 —электрическая постоянная, равная $8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м;

ρ —объемная плотность заряда, Кл/м³.

Решение любой задачи по расчету электрических полей может быть произведено аналитически или с использованием численных методов [20, 30, 46, 47, 107, 108]. Эффективное применение аналитических методов расчета (метод зеркальных изображений, метод конформных преобразований, решение краевых задач с использованием функции Грина, метод разделения переменных и т.д.) возможно в тех случаях, когда форма проводников, несущих первичные токи, может быть достаточно просто представлена в какой-либо системе координат (декартовой, цилиндрической, сферической и т.п.) [7, 30, 47]. Применительно к установкам высоких напряжений, аналитический подход целесообразен при расчете поля линий электропередачи (ЛЭП) [7, 30]. Однако эти аналитические методы приме-

нительно к Таджикистану не могут быть применены в полном объёме в связи с тем, что они предназначены для простых задач и не учитывают влияние на значение напряженности электрического поля, например, рельефа местности.

Расчет и анализ электрических полей в инженерной практике можно условно разделить на три этапа [30, 46, 47, 105]:

Первым этапом является выбор численного метода и составление расчётной модели изучаемого объекта, описывающей его основные физические и технические характеристики и учитывающей особенности применяемого метода расчёта. При этом определяют, какие элементы конструкции учитываются в расчётной модели, а какими для упрощения расчёта пренебрегают, поскольку они оказывают малое влияние на поле в интересующей области (например, ввиду удалённости от последней или малости влияния на результат решения задачи). Определяют приемлемость тех или иных принимаемых допущений, к которым, например, относится предположение об идеальной проводимости грунта или каких-либо других объектов, обладающих высокой относительной диэлектрической проницаемостью. К этому же этапу относится определение части расчётной области, подлежащей детальному изучению, и исследуемых в ней характеристик поля.

Второй этап—это собственно расчёт определённых ранее параметров поля в заданной расчётной области при помощи выбранного метода.

На третьем этапе производится обработка и анализ полученных результатов расчёта. Для этого строятся распределения параметров поля в расчётной области, силовые линии и эквипотенциали, распределение поля вдоль них. Затем выполняется анализ полученных данных, предусматривающий сопоставление полученных значений напряженности и потенциала с допустимыми значениями.

В настоящее время существует множество численных методов расчета электрического поля. Они существенно различаются как по своим возможностям (точности, требованиями к быстродействию и оперативной памяти ЭВМ), так и по сложности их практической реализации (т.е. по требованиям к реализации этих методов).

Наибольшее распространение получили следующие численные методы, широко применяемые на практике [7, 20, 30, 57, 60, 61]:

- метод конечных разностей (МКР);
- метод конечных элементов (МКЭ);
- метод граничных элементов (МГЭ);
- метод интегральных уравнений (МИУ);
- метод эквивалентных зарядов (МЭЗ);
- гибридный метод;
- метод моментов.

Метод конечных разностей или, как часто его называют, метод сеток – наиболее старый и относительно простой метод, поскольку требует минимальной математической работы. МКР довольно успешно применялся и применяется в настоящее время для решения широкого круга задач по расчету электрических полей. В этом методе исследуемая область разбивается двумерной или трехмерной сеткой в зависимости от размерности задачи.

Частные производные в уравнениях Пуассона или Лапласа заменяются соответствующими им конечно-разностными аппроксимациями на прямоугольной конечно-разностной сетке. В результате получается система алгебраических уравнений относительно неизвестных потенциалов в узлах сетки. Матрица коэффициентов получаемого матричного уравнения содержит большое количество нулевых элементов. По этой причине данное уравнение решается преимущественно итерационными методами. Недостатками метода являются необходимость применения специальных методов хранения слабо заполненных матриц (методы, основанные на приведении матрицы к ленточному виду, методы факторизации и др.), а также сложность описания криволинейных поверхностей тел из-за применения прямоугольной конечно-разностной сетки.

Метод конечных элементов сегодня приобрел широкое распространение. Его популярность обусловлена приемлемой точностью решения, возможностью описания криволинейных границ области любой сложности, лёгкостью учета гра-

ничных условий различных типов и расчёта поля с объемным зарядом, автоматическим расчётом значений потенциала во всех узлах и, следовательно, быстротой вычисления потенциала и напряженности в любой точке области. МКЭ основан на интегральной формулировке граничной задачи. Исследуемая область делится на плоские или объемные элементы (в зависимости от размерности задачи), в которых неизвестное распределение поля аппроксимируется полиномами. Использование метода Рэлея – Ритца позволяет затем получить систему линейных алгебраических уравнений, из решения которой в конечном итоге будут получены значения потенциалов в каждом узле сетки конечных элементов. После этого при помощи аппроксимации легко определить значение потенциала в произвольной точке. Формирование и решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) – основные этапы решения задачи методом конечных элементов. По объему вычислений и необходимой компьютерной памяти они значительно превосходят остальные этапы, поскольку СЛАУ в МКЭ обычно имеют высокий порядок. Трудности, возникающие при решении СЛАУ традиционными методами, зачастую препятствуют использованию МКЭ для исследования полей в сложных областях, требующих построения конечно – элементных сеток с большим количеством узлов.

МКЭ имеет некоторое преимущество перед МКР в гибкости, так как с его помощью легко учитываются сложные границы. Метод обеспечивает прекрасные возможности визуализации результатов расчёта. Вместе с тем МКЭ не лишён недостатков, к которым относится сложность его программной реализации, необходимость создания сетки элементов во всей области, что требует большого объема компьютерной памяти. Применение этого метода приводит к заметным погрешностям расчёта вблизи поверхностей электродов. Последнее не характерно для интегральных методов, которые дают одинаковые погрешности во всей расчётной области. Кроме того, МКЭ позволяет точно рассчитывать распределение потенциалов, но погрешности в значениях напряженности оказываются на порядки больше. Также МКЭ не позволяет рассчитывать поля в неограниченном пространстве. Таковы, например, поля воздушных линий электропередачи. Чтобы решить по-

добную задачу методом конечных элементов, приходится искусственно ограничивать расчётную область, задавая на фиктивных границах нулевые граничные условия 1–го или 2–го рода.

Метод граничных элементов представляет собой соединение двух подходов решения краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными, т.е. сведение краевых задач к эквивалентным интегральным уравнениям и аппроксимация решений при помощи функций формы, подобных используемым в МКЭ. Т.е. в МГЭ уравнение, описывающее поле, с помощью функции Грина, преобразуется в интегральное уравнение относительно неизвестных функций поля на границе. Граница разбивается на отдельные элементы, поле на которых аппроксимируется полиномами. Преимуществом метода является уменьшение размерности задачи и, как следствие, меньшая, по сравнению с методом конечных элементов, требуемая память ЭВМ и время счета. Недостаток МГЭ – оперирование полными несимметричными матрицами с коэффициентами, вычисляемыми путем численного интегрирования.

Интегральные методы основаны на замещении реального распределения заряда по поверхностям электродов системой фиктивных зарядов, размещенных на поверхностях или внутри тел, поле образующей системы. Значения зарядов находятся из граничных условий, включая эквипотенциальность электродов. После их определения потенциал и напряженность поля в любой точке межэлектродного пространства находятся методом наложения. Иначе говоря, в рамках интегральных численных методов на основании граничных условий вычисляется аппроксимация распределения источников поля по поверхностям электродов.

Суть метода интегральных уравнений состоит в замещении реального распределения заряда по поверхностям электродов простыми слоями распределённых по ним зарядов, которые определяются граничными условиями. Основное достоинство метода интегральных уравнений – высокая точность получаемых значений напряжённости поля во всей расчётной области, включая поверхность электродов. Это положительно отличает его от МКР и МКЭ. Другая отличительная черта МИУ, заключается в том, что он требует лишь дискретизации границ

тел, поле образующей системы, и ему не требуется сетка в межэлектродном пространстве, что обуславливает и достоинства, и недостатки метода, которые проявляются в зависимости от характера решаемой задачи. С одной стороны, благодаря этому решение может быть найдено в открытой области без каких-либо дополнительных искусственных ограничений. С другой стороны, расчёт значений напряжённости поля в точках межэлектродного промежутка методом интегральных уравнений требует численного интегрирования, что приводит к большому объёму дополнительных вычислений. Если задача такова, что нет необходимости анализировать поле во всём межэлектродном пространстве и число расчётных точек невелико, то серьёзных проблем не возникает. В противном же случае применение МИУ становится проблематичным. Эта особенность метода также затрудняет компьютерную визуализацию результатов.

Метод эквивалентных зарядов можно рассматривать как упрощённый вариант МИУ. Поскольку состоит в замещении реального распределения заряда по поверхностям тел системой размещённых внутри них фиктивных эквивалентных зарядов, чьи значения находятся из граничных условий. Однако в МЭЗ поле в любой точке межэлектродного промежутка определяется в соответствии с принципом наложения полей дискретных эквивалентных зарядов и не требует численного интегрирования. Достоинства и недостатки МИУ, в основном, остаются справедливыми и для МЭЗ. В задачах с не слишком сложной геометрией тел данный метод более экономичный, чем МИУ. Также МЭЗ имеет сравнительную простоту программной реализации.

Метод моментов, реализованный посредством NIFREQ, использовался в [57].

Особое значение получил в последние годы гибридный метод. Согласно этому методу при решении конкретной задачи выбираются преимущества двух численных методов (МГЭ и МКЭ) с одним решающим устройством. Идея создания гибридного метода, несомненно, выигрышная, но осуществить гибридный метод весьма сложно. Также возникает сложность в принятии решения, какой метод как основополагающий использовать в каждой объемной области или дву-

мерной области в зависимости от типа задачи. Наиболее общая стратегия предполагает использование граничных элементов во всех линейных областях и конечных элементов во всех нелинейных областях (но в линейных областях использование МКЭ также допустимо, причем в некоторых из них –желательно). Если поверхностная область объема больше объема, который она охватывает, и средняя точность решения является достаточной, МКЭ–наиболее предпочтительный метод. Этот метод будет в ближайшем времени доминирующим способом анализа электрического поля. Подтверждением этого является компания Integrated Engineering Software, продвигающая концепцию расчета полей посредством гибридных методов.

В работе [47, 57, 60] отмечается преимущество МКЭ при решении стационарных задач, как более гибкого и экономичного. Действительно, практически все программные комплексы, ориентированные на решение статических и стационарных задач, используют именно данный метод.

Выбранный метод конечных элементов позволяет решить задачу по построению карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ с применением программы Mechanical APDL (ANSYS 13) (производства фирмы Ansoft) на компьютерном кластере «СКИФ Аврора–ЮУрГУ», последовательности и результаты решения которых представлены в следующих параграфах.

3.2 Разработка методики построения распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ с помощью вычислительного кластера

Как было показано в 2.3 диссертации рассчитывать напряженность электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, проходящей по местности с переменном рельефом и при подъеме гору, методом зеркальных отображении нецелесообразно в связи с тем, что данный метод применим при расположении проводов фаз парал-

лельно поверхности земли и не учитывает такие факторы как неоднородность рельефа местностей, над которым расположены провода фаз, и изгиб проводов за счет собственного веса.

В связи с этим для решения поставленной задачи была разработана методика расчета напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ с представлением пролетов в цифровом виде, учитывающем как рельеф местности, так и температурные условия.

Для участков, где были проведены измерения сотрудниками кафедрой «Безопасности жизнедеятельности» ЮУрГУ[89], с учетом рельефа местности и температурных условий были смоделированы пролеты (с пересеченным рельефом местности и при подъеме линии в гору).

Как и в существующих моделях, в нашей модели были приняты следующие начальные допущения:

- не учитывалось влияние грозозащитных тросов на значения напряженности ЭП в расчетных точках;
- моделирование проводилось на удалении свыше 60 м от любой из опор, поскольку вблизи опор значения напряженности электрического поля не превышают 5 кВ/м, т.е это пространство не является зоной действия электрического поля;
- пренебрегаем явлением коронного разряда.

Компьютерные модели эскизов опор с провесами фазных проводов (с учетом изменения температуры окружающего воздуха) и изменения поверхности рельефа местности строились в программной среде Solidworks 2013, с последующим преобразованием данных эскизов в 3-х мерную модель. Преимущество программной среды Solidworks 2013 для начального построения заключается в простоте и удобстве модели объемных объектов сложной формы.

Исходные данные для эскизов приведены ниже:

- при подъеме линии в гору согласно профилю расстановки опор установлены анкерно – угловые трехстоечные свободно стоящие опоры марки У–30 с высотой $H=27$ м и $h=22$ м до места крепления проводов к изоляторам;

- с пересеченным рельефом местности установлены опоры марки ПБ – 2 с высотой $H=27$ м и $h=22$ м до места крепления проводов к изоляторам с учетом высоты гирлянды изоляторов $\lambda=5$ м;
- протяжённость пролета (подъем линии в гору) равнялась $l_{пр} = 350$ м, а пролета (с пересеченным рельефом местности) $l_{пр} = 240$ м ;
- радиус проводов фаз задавался как эквивалентный радиус. Значение эквивалентного радиуса рассчитывалось по формуле (2.23). Для расщепленной фазы ВЛ 500 кВ $n=3$, $r_э = 13,4$ см.
- разность расстановки опор по продольному профилю с учетом рельефа местности для пролета при подъёме линии в гору $\Delta h = 15,8$ м а для пролета с пересеченным рельефом местности $\Delta h = 1 \div 2$ м.

На рисунке 3.1 представлена неоднородность рельефа местности пролета (с пересеченным рельефом местности), построенного в программной среде Solidworks 2013.

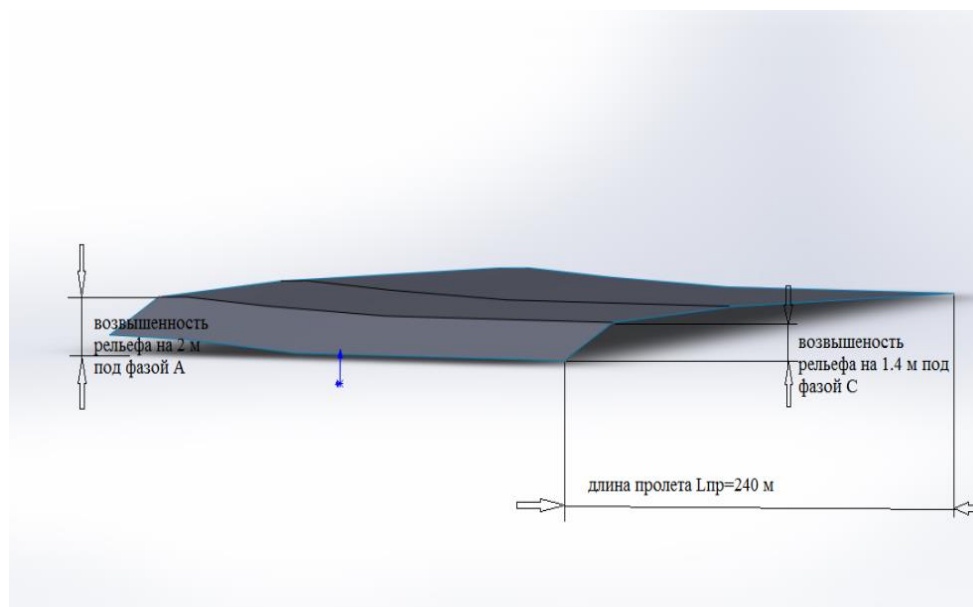


Рисунок 3.1 – Неоднородность рельефа местности пролета (с пересеченным рельефом местности)

Последовательность преобразования 2–х мерной модели в 3–х мерную в программной среде Solidworks 2013 приведена ниже:

1. Для преобразования проводов фаз из линии в провода с эквивалентным радиусом круглого сечения использовалась функция бобышка/основание по траектории с вытягиванием с одной опоры к другой, равной длине пролетов;
2. Для преобразования рельефа местности и опоры с 2 – х мерной в 3 – х мерную использовалась функция вытянутая бобышка/основание с площадями для пролета при подъеме линии в гору $S=200 \times 33 = 6600 \text{ м}^2$ и для пролета с пересеченным рельефом местности $S=130 \times 33 = 4290 \text{ м}^2$ без учета 60 м от опор.

На рисунках 3.2–3.3 приведены 3–х мерные модели данных пролетов.

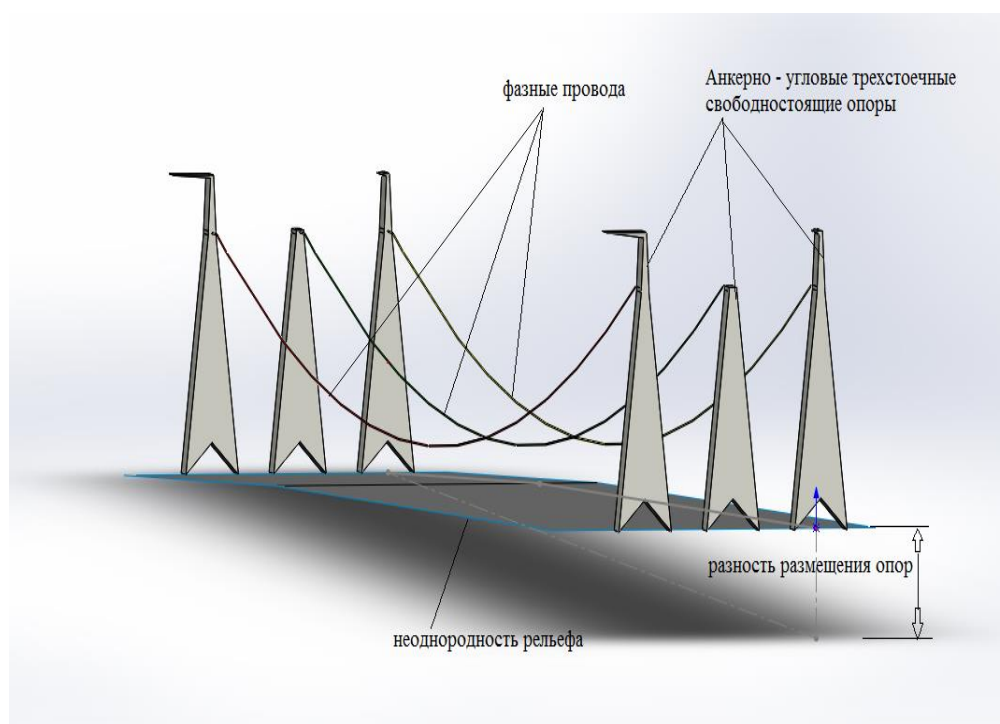
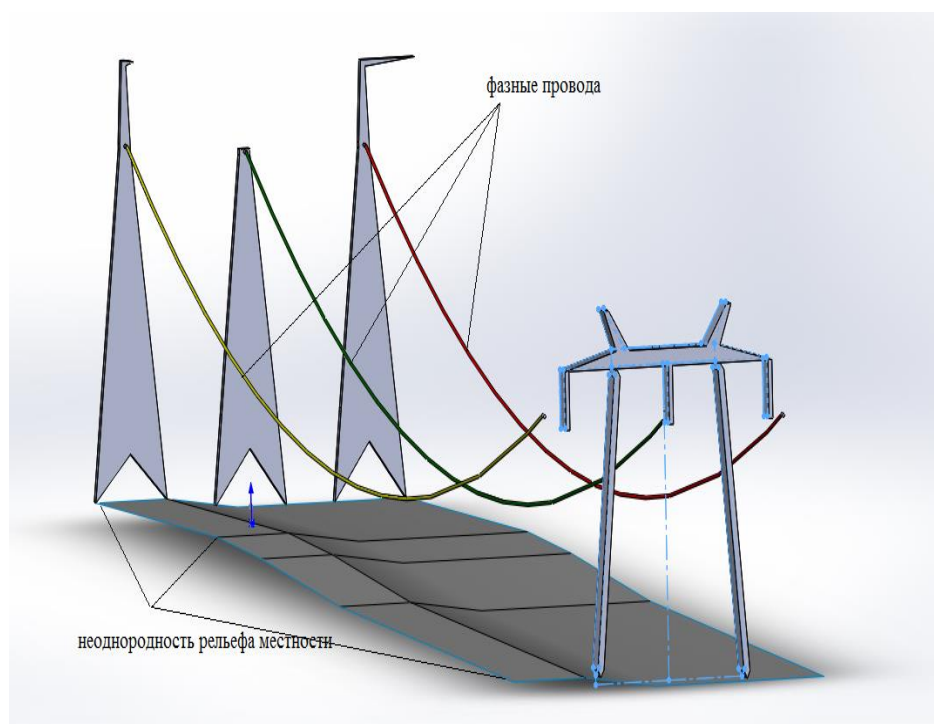


Рисунок 3.2 – 3 – х мерная модель пролета ВЛЭП 500 кВ (подъем линии в гору)



*Рисунок 3.3 – 3 – х мерная модель пролета ВЛЭП 500 кВ
(пересечённый рельеф местности)*

Построенные в программе Solidworks 2013 модели преобразовывались в формат либо parasolid (*.x_t), либо в IGES (*.igs) для дальнейшего импорта в программу Mechanical APDL (ANSYS 13) где и рассчитывались напряженности ЭП для выбранных пролетов. При импортирование файлов в программу Mechanical APDL (ANSYS 13) в полученных моделях исключались опоры.

Последовательность загрузки файлов моделей в программу Mechanical APDL (ANSYS 13) и дальнейшее решение задачи приведены в приложений 1 А.

3.3 Карты распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, построенные с помощью вычислительного кластера

Результаты расчета напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, полученные в программе Mechanical APDL (ANSYS 13) с приме-

нением вычислительного кластера «СКИФ Аврора–ЮУрГУ», для пролетов с пересеченным рельефом местности и при подъёме линии в гору приведены в таблицах 3.1–3.2.

Для наиболее характерных участков (рисунки 3.4–3.5), где ранее были произведены замеры ЭП, по разработанной методике построены расчетные карты распределения напряженности ЭП в программе Mechanical APDL (ANSYS 13) для других же участков значения напряженности ЭП занесены в таблицы 3.1–3.2.

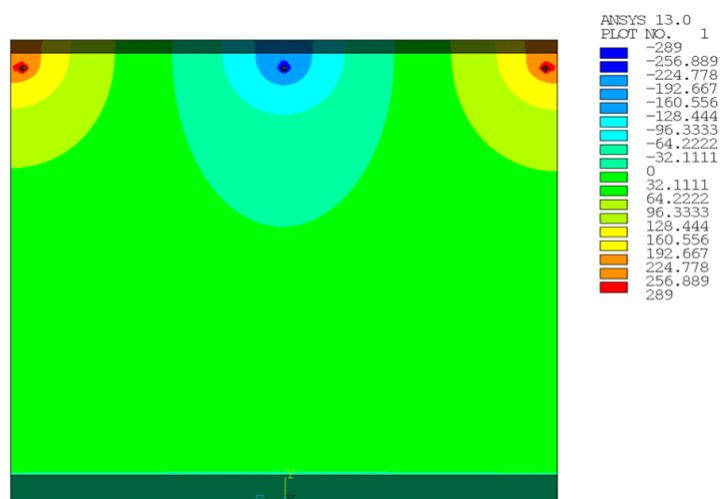


Рисунок 3.4 – Распределение напряженности ЭП ПЧ для участка $X=80$ м от опоры (пересеченный рельеф местности)

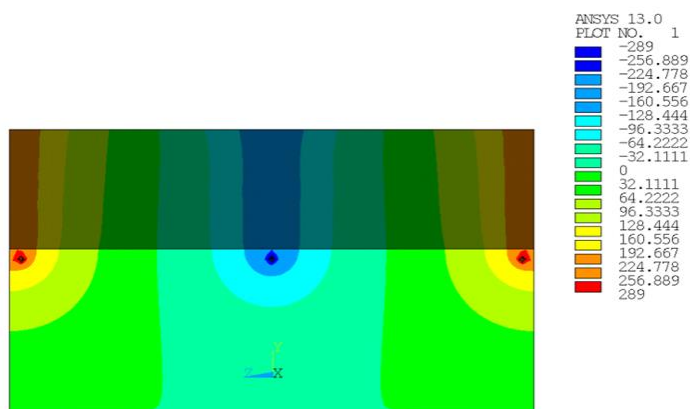


Рисунок 3.5 – Распределение напряженности ЭП для участка $X=240$ м от опоры (подъем линии в гору)

Таблица 3.1 – Расчетные значения напряженности ЭП, полученные в программе Mechanical APDL (ANSYS 13) с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора–ЮУрГУ», (пересеченный рельеф местности ; t =+ 24 °С)

Расстояния между опорами	6м от фазы С	3м от фазы С	под крайней фазой С	между фазами В и С	под средней фазой В	между фазами А и В	под крайней фазой А	3м от фазы А	6м от фазы А
40м	3,10	4,56	4,95	3,77	2,87	3,99	4,46	4,20	2,90
50м	3,79	4,28	4,34	3,50	2,66	3,34	3,92	3,40	3,70
60м	4,50	8,50	7,76	3,46	2,66	3,34	5,74	4,20	3,64
70м	3,70	4,20	3,70	2,32	3,12	3,30	7,20	4,00	3,34
80м	3,36	3,43	4,23	3,35	3,53	3,35	3,23	4,30	3,36
90м	4,44	7,52	8,52	4,42	5,80	4,42	7,32	8,52	4,64
100м	4,94	4,58	4,88	4,40	4,00	3,70	5,38	4,58	5,94
110м	3,50	4,59	5,39	3,47	4,25	4,77	4,39	4,59	3,50
120м	3,50	3,59	3,39	2,48	2,85	4,48	3,39	3,59	3,5

Таблица 3.2 – Расчетные значения напряженности ЭП, полученные в программе Mechanical APDL (ANSYS 13) с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора–ЮУрГУ», (подъем линии в гору; t =+ 24 °С)

Расстояния между опорами	под крайней фазой С	между фазами В и С	под средней фазой В	между фазами А и В	под крайней фазы А
80м	10,10	5,92	3,70	5,70	10,20
100м	8,20	7,42	4,65	5,70	9,50
120м	11,52	8,80	10,10	6,56	11,52
140м	14,18	8,42	9,10	8,60	14,58
160м	11,52	8,68	8,65	8,56	12,64
180м	12,85	9,92	9,40	8,89	12,84
200м	13,00	9,30	10,00	9,30	12,50
220м	13,18	10,42	9,10	8,60	15,58
240м	15,18	7,82	9,20	7,60	12,58
260м	11,52	8,80	6,92	7,60	10,20
280м	8,20	7,42	4,65	5,70	5,92

3.4 Сопоставление результатов, полученных расчетным путем и экспериментальным способом

Для сопоставления результатов, полученных расчетным путем с экспериментальными значениями полученными сотрудниками кафедры «Безопасности жизнедеятельности» [89] по результатам приведенных в таблицах 3.1 – 3.2 строим поперечные изменения напряженности ЭП для наиболее характерных участков (на расстоянии 80 м от опоры для пересеченного рельефа местности и на расстоянии 240 м от опоры для подъема линии в гору), вдоль пролетов под фазой С и карты распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ для данных пролетов.

На рисунке 3.6 приведено изменение напряженности электрического поля поперек пролета ВЛ 500 кВ (пересеченный рельеф местности) на расстоянии 80 м от опоры при $t = +24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

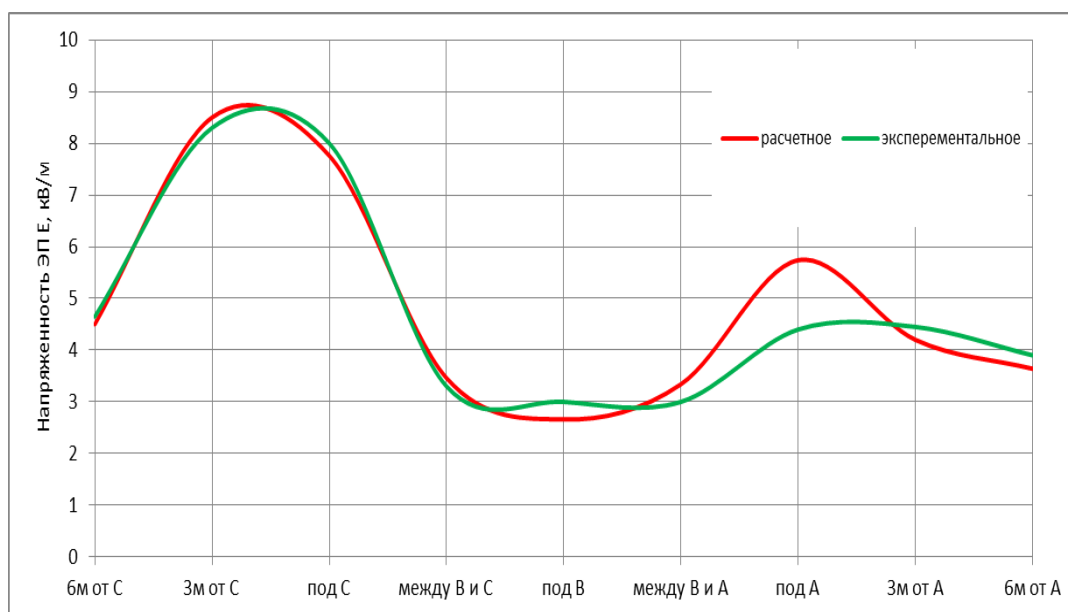


Рисунок 3.6 – Изменение напряженности электрического поля поперек пролета ВЛ 500 кВ (с пересеченный рельеф местности) на расстоянии 80 м от опоры; $t = +24\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 3.7 приведено изменение напряженности поперек пролета ВЛ 500 кВ (подъем линии в гору) на расстоянии 240 м от опоры в сопоставлении с экспериментальными значениями, полученными сотрудниками кафедры «Безопасности жизнедеятельности» [89] для данных участков, с учетом температурных условий.

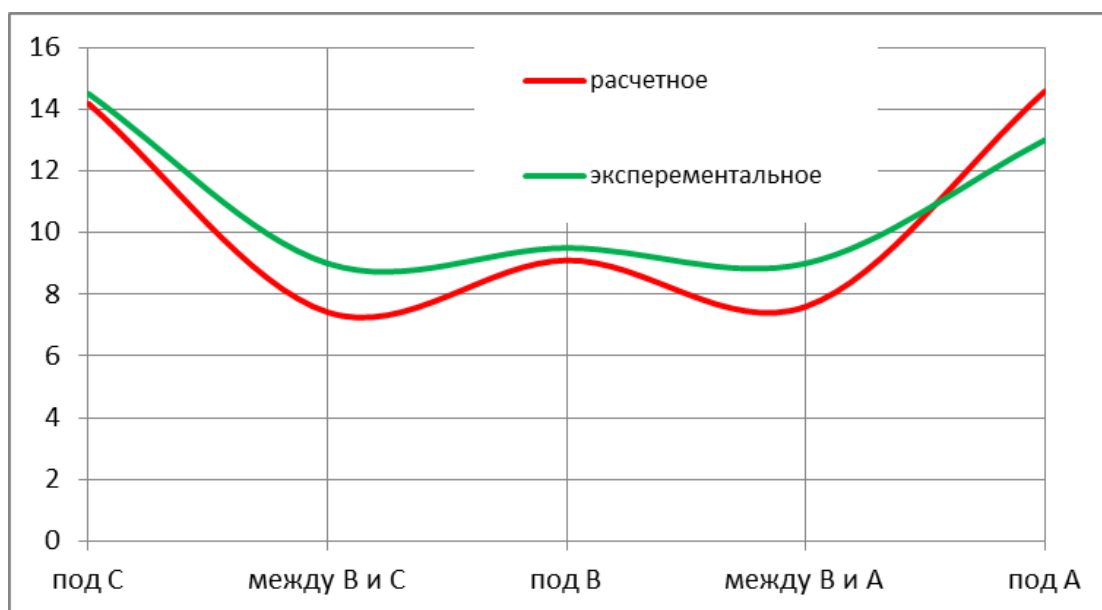


Рисунок 3.7 – Изменение напряженности поперек пролета ВЛ 500 кВ (подъем линии в гору) на расстоянии 240 м от опоры; $t = + 24 \text{ }^\circ\text{C}$

На рисунках 3.8 – 3.9 приведены расчетные кривые изменения напряженности ЭП вдоль пролетов ВЛ 500 кВ (с пересеченным рельефом местности и подъем линии в гору) под фазами С в сопоставлении с кривыми изменения напряженности ЭП вдоль данных пролетов, полученными экспериментальным путем сотрудниками кафедры «Безопасности жизнедеятельности» [89].

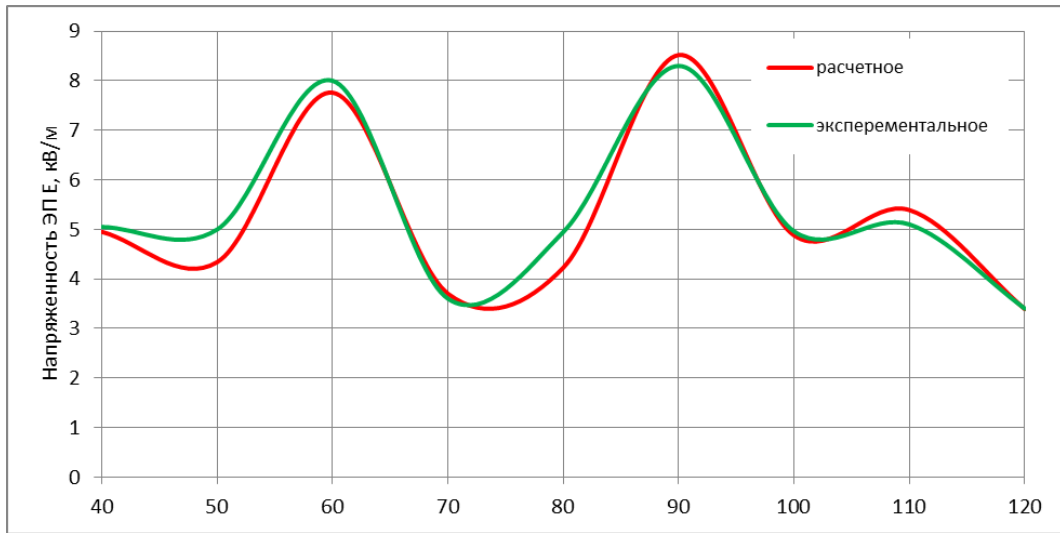


Рисунок 3.8 – Расчетные кривые изменение напряженности ЭП вдоль пролета ВЛ 500 кВ (пересеченный рельеф местности) под фазой С; $t = + 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

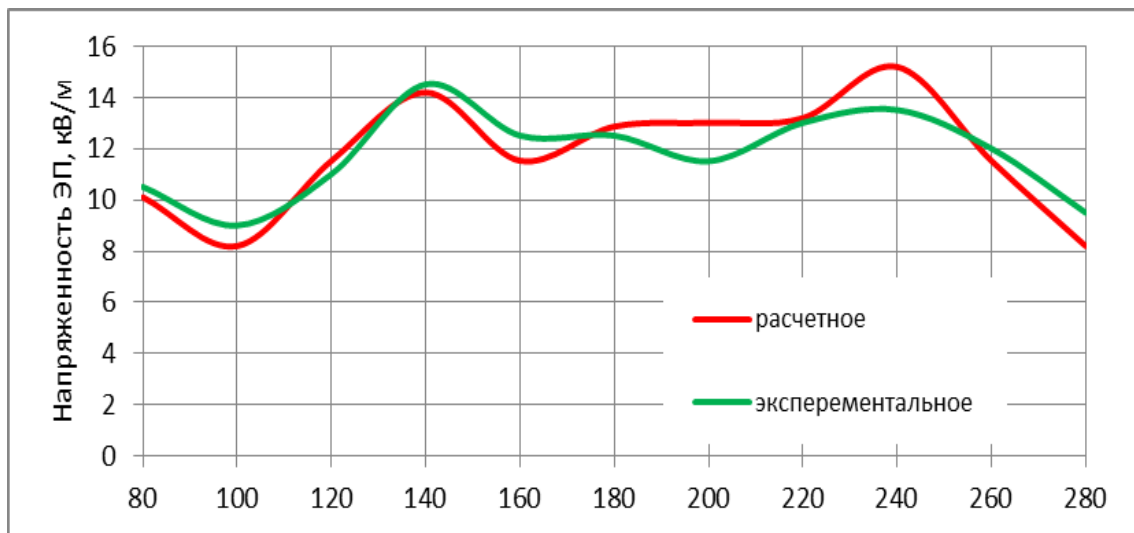


Рисунок 3.9 – Расчетные кривые изменение напряженности ЭП вдоль пролета ВЛ 500 кВ (подъем линии в гору) под фазой С; $t = + 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

По расчетным кривым изменениям напряженности ЭП вдоль пролетов под фазами С средняя относительная погрешность составляет 6 % от экспериментальных данных [89], что является приемлемым.

На рисунке 3.10 приведена карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (пересеченный рельеф местности), построенная по расчетным дан-

ным, а на рисунке 3.11 карта распределения напряженности ЭП вдоль этой же ВЛЭП 500 кВ.

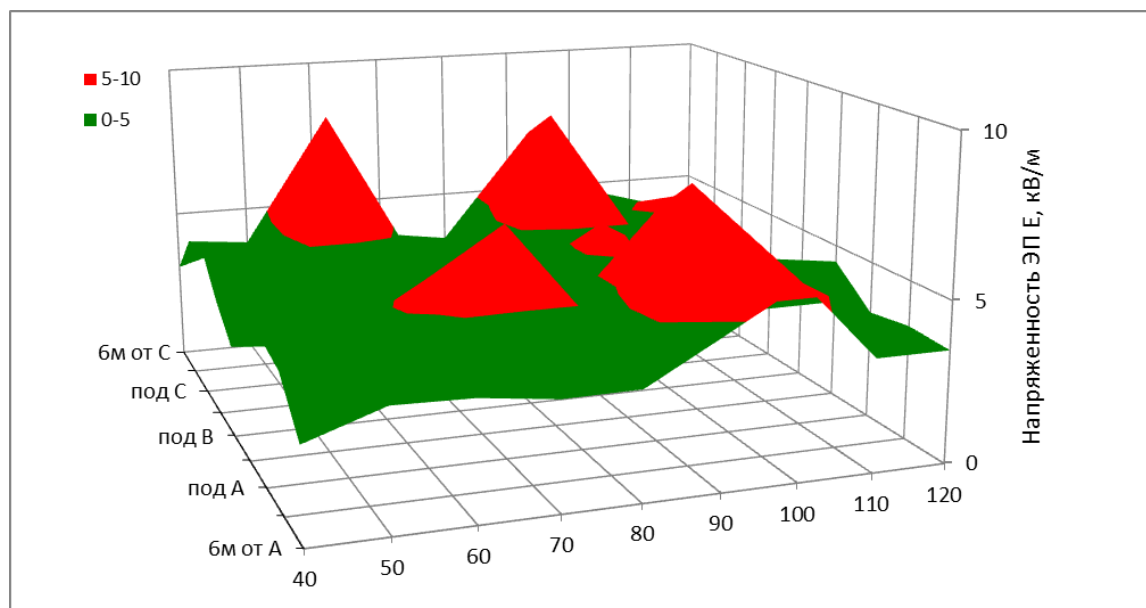


Рисунок 3.10 – Расчетная карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (пересечённый рельеф местности) построенная по расчетным данным; $t = + 24 \text{ }^\circ\text{C}$

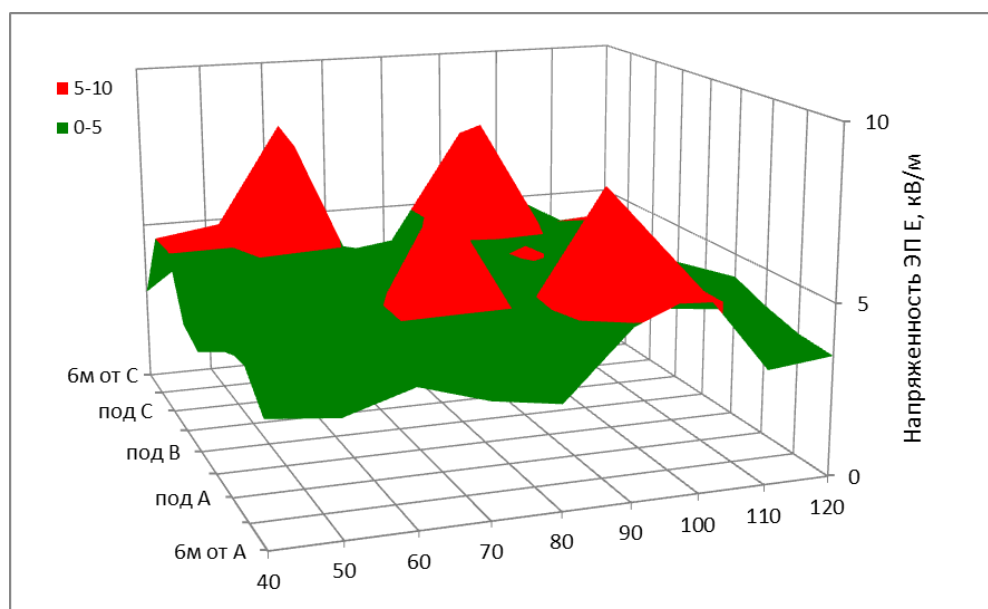


Рисунок 3.11 – Карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ пролета (пересечённый рельеф местности), построенная по результатам измерений; $t = + 24 \text{ }^\circ\text{C}$

На рисунках 3.12, 3.13, приведены аналогичные карты, только при подъёме линии в гору.

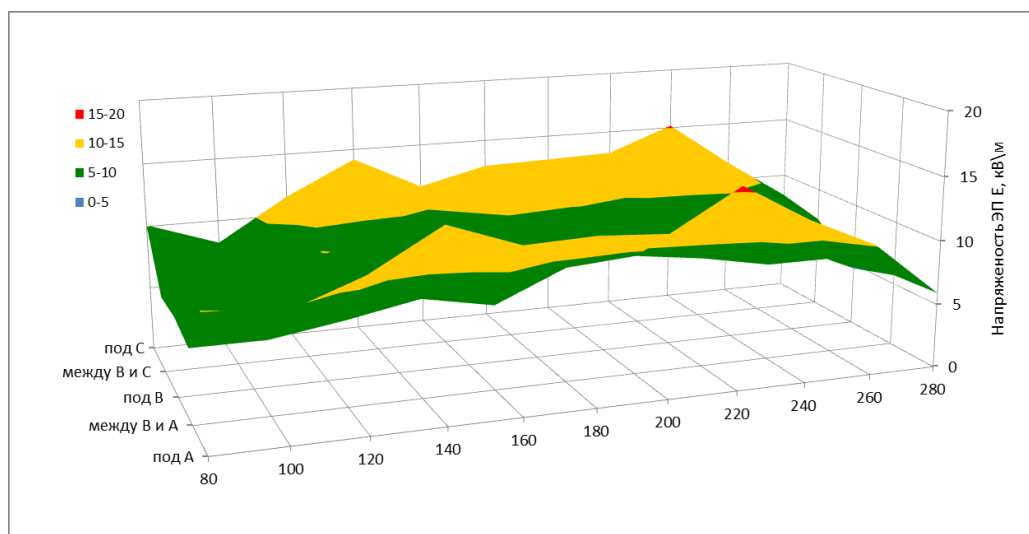


Рисунок 3.12 – Расчетная карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (при подъёме в гору), построенная по расчетным данным; $t = + 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$

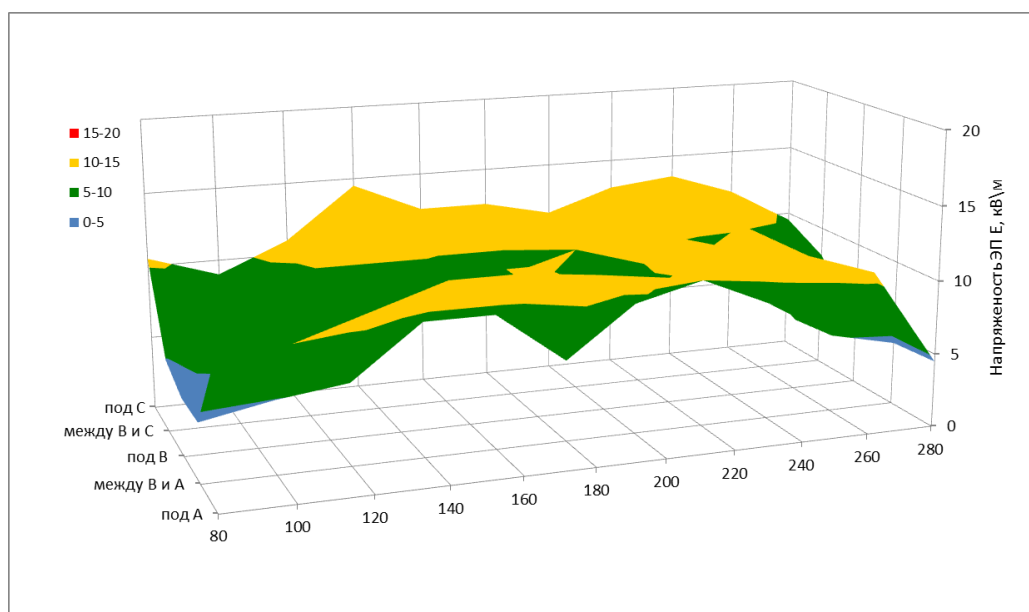


Рисунок 3.13 – Карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (при подъёме линии в гору), построенная по результатам измерений; $t = + 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Согласно рисункам 3.6 – 3.9 и 3.10, 3.12 построенных по результатам разработанной нами методики с применением программной среды Mechanical APDL (Ansys 13) с использованием для расчетов вычислительного кластера «СКИФ Аврора ЮУрГУ» и сопоставлением с результатами полученных экспериментальным

способом показало, что относительная погрешность полученных значений напряженности ЭП расчетным путем не превышает 10% от измеренных.

Это дает основание утверждать о возможности и целесообразности применения разработанной методики расчета значения напряженности электрического поля промышленной частоты в условиях Республики Таджикистан.

3.5 Выводы.

1. Проведен анализ числовых методов, применяемых для расчета напряженности ЭП ПЧ ЭУ СВН.

2. С использованием программной среды Solidworks 2013 были построены модели пролетов ВЛЭП 500 кВ с учетом изменения как продольного так и поперечного рельефа местности и температуры окружающего воздуха.

3. С применением программной среды Mechanical APDL (Ansys 13) и вычислительного кластера «СКИФ Аврора ЮУрГУ» по разработанной методике построения распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ для полученных моделей рассчитано распределения напряженности ЭП ПЧ по результатам которых построены продольные и поперечные карты.

4. Полученные результаты расчетным путем по разработанной методике с применением программной среды Mechanical APDL (Ansys 13) сопоставлены с измеренными значениями. Результаты сопоставления показали, что относительная погрешность расчетных значений не превышает 10% от измеренных.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ МЕР ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО ИЛИ РАБОТАЮЩЕГО ВБЛИЗИ ВЛЭП 500 кВ

Учитывая температуру окружающей среды в Республики Таджикистан, особенно в юго-западной части региона, где проходят ВЛЭП 500 кВ и сложный рельеф местности, следует отметить, что применение существующих средств защиты от электрических полей (например, индивидуальных средств защиты), создаваемых этими линиями, в условиях Республики Таджикистан не достаточно эффективно [42, 89]. Следует учитывать и тот фактор, что площадь территории Республики Таджикистан, удобной для ведения сельского хозяйства составляет всего 7%. Это вынуждает население проживать и вести сельскохозяйственную работу в санитарно – защитной зоне линий 500 кВ, оказываясь при этом под воздействием электрических полей промышленной частоты.

В связи с этим ставится задача разработать комплекс защитных мероприятий для линейного персонала и местного населения.

4.1 Применение расчетных карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ для организации работ по обслуживанию этих линий

Наиболее простым и экономичным решением для организации защиты линейного персонала и населения от действия электрических полей промышленной частоты является применение расчетных карт распределения напряженности электрических полей вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ, построенных по разработанной нами методике [74, 78, 80, 84, 85, 93] и учитывающей такие факторы как изменения орографии местности и температуры окружающей среды. При этом необходимо отметить, что данная методика внедрена в практику

работы Открытой акционерной холдинговой компании (ОАХК) «Барки Точик» Республики Таджикистан в виде руководящего документа РД 1М-001-2014 (Построение карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ) [76] и приведена в приложении 1.

По разработанной нами методике для всех пролетов линии 500 кВ, проходящей по юго-западной части Республики Таджикистан были рассчитаны распределения напряженности электрических полей промышленной частоты при различных температурах окружающего воздуха (от плюс 27 °С до плюс 45°С с шагом изменения температуры плюс 3°С).

Общее количество пролетов между опорами вдоль данной линии составило 533.

Ниже на рисунке 4.1 представлено влияние рельефа местности и температуры окружающего воздуха на изменения напряженности электрического поля промышленной частоты вблизи воздушной линии электропередачи напряжением 500 кВ.

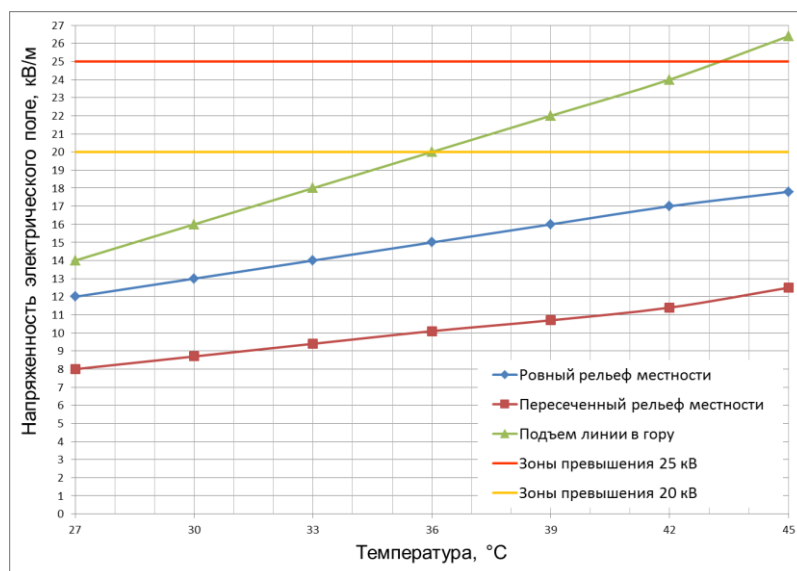


Рисунок 4.1- Влияние рельефа местности и температуры окружающего воздуха на изменение напряженности ЭП ПЧ вблизи ВЛЭП 500 кВ

Из рисунка 4.1 видно, что с увеличением температуры окружающего воздуха значение напряженности электрического поля промышленной частоты увеличивается. Согласно рисунку 4.1 при одних и тех же температурах окружающего воздуха, но при разном рельефе местности значения напряженности электрического поля промышленной частоты существенно отличаются. Особенно надо отметить изменения напряженности электрического поля промышленной частоты при подъеме линии в гору. Как видно из рисунка 4.1 при подъеме линии в гору в местах наибольшего провиса проводов при различных температурах окружающего воздуха значения напряженности ЭП ПЧ увеличивается до 20 кВ/м и более, достигая при температуре плюс 45°С значения 26,4 кВ/м.

Ниже на рисунках 4.2–4.4 с шагом 1 м приведены примеры для трёх характерных пролётов с разным рельефом местности продольных диаграмм распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ для различных температур окружающего воздуха.

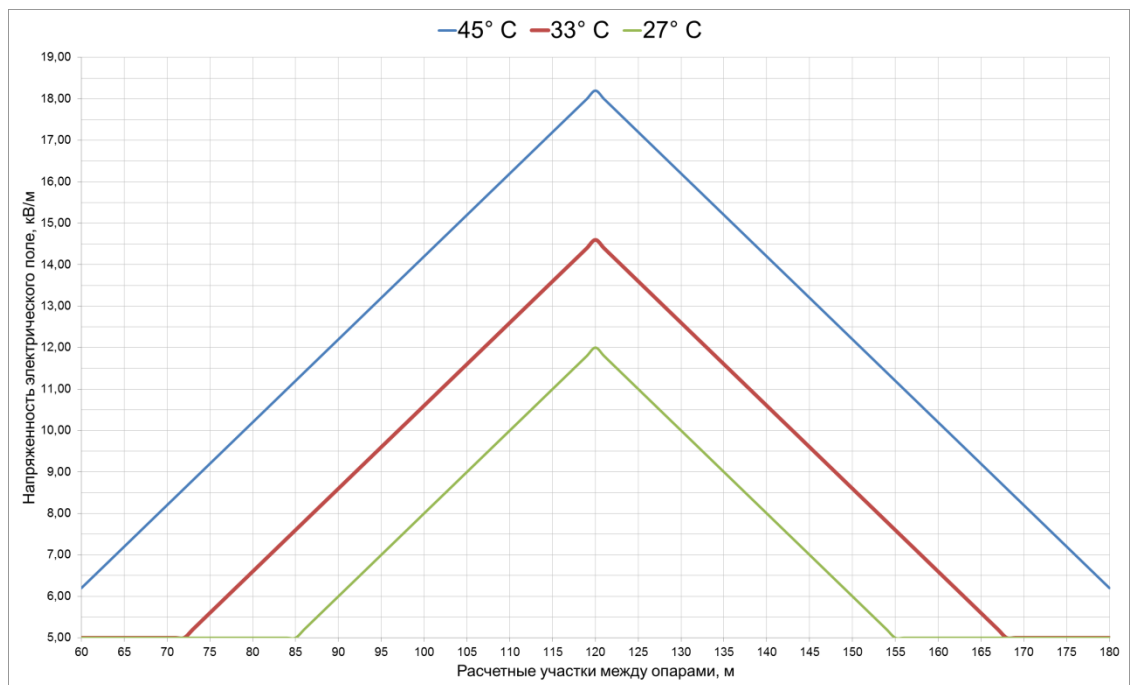


Рисунок 4.2 - Продольные диаграммы распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ (ровный рельеф местности; при $t = +27; 33; 45$ °С)

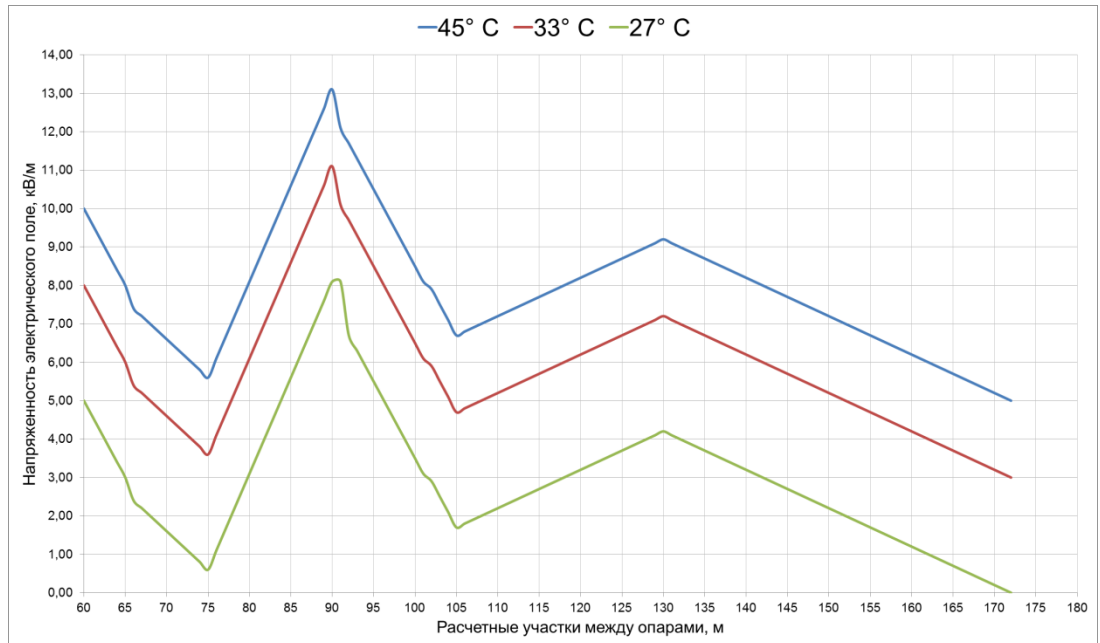


Рисунок 4.3 - Продольные диаграммы распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ (пересеченный рельеф местности; при $t = +27; 33; 45$ °С)

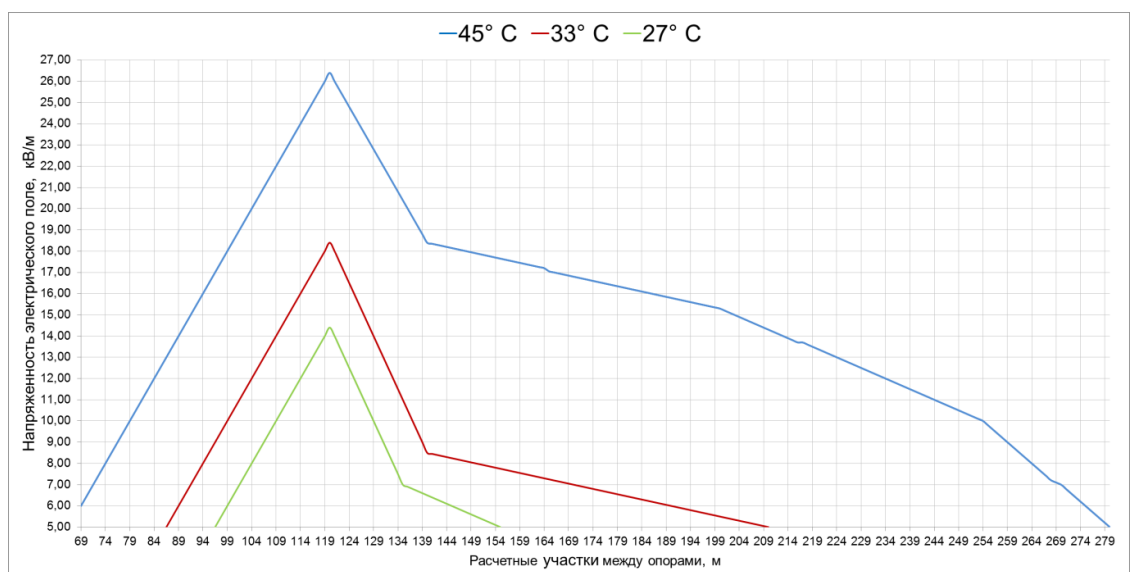


Рисунок 4.4 - Продольные диаграммы распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ (при подъёме линии в гору; при $t = +27; 33; 45$ °С)

Из рисунков 4.2-4.4 видно, что при уменьшении температуры окружающего воздуха зона действия ЭП ПЧ уменьшаются. Так, при температуре окружающего воздуха плюс 27°С для линии, поднимающейся в гору (рисунок 4.4), напряженность

ЭП ПЧ не превышает 15 кВ/м, тогда как для этого же пролета, но при температуре окружающего воздуха равной плюс 45°C (рисунок 4.4) значения ЭП ПЧ превышают 25кВ/м. При указанной напряженности ЭП ПЧ без применения средств индивидуальной защиты работать запрещено. Заметим, что с учетом климата применение указанного средства защиты от действия ЭП ПЧ вызывает у линейного персонала дискомфорт.

Для предотвращения вредного действия электрического поля на организм персонала, обслуживающего линии напряжением 500 кВ, необходимо, чтобы приведенное время пребывания персонала в зоне действия электрического поля не превышало 8 ч [24]. В этом случае в организме работника по обслуживанию линий электропередачи не наблюдается отрицательных изменений [62, 63, 74, 91, 104].

Это можно обеспечить путем подбора таких временных отрезков на календаре, когда на любом пролете работа не приведёт к превышению допустимого приведенного времени пребывания линейного персонала в зонах действия электрических полей промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ. Таким образом, применяя расчетные карты распределения напряженности электрических полей промышленной частоты, можно организовать работу так, чтобы приведенное время не превышало 8 ч, что соответствует требованиям, изложенным в [24].

4.2 Проект организации работ при обслуживании линий электропередачи напряжением 500 кВ с учетом условий Республики Таджикистан

Учитывая климатические условия Республики Таджикистан и рельеф местности, следует отметить, что максимальная напряженность электрического поля наблюдается летом (начиная с конца июня до конца августа), в середине дня, когда температура воздуха максимальна, а, следовательно, максимальны стрела провеса и напряженность электрического поля под линией. Работы по расчистке трасс вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ, согласно

данным ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан, проводятся только в летний период времени.

Рассмотрим организацию работ на примере пролетов ВЛЭП 500кВ (рисунки 4.2-4.4).

Согласно [62, 63, 74, 91, 104] время пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью электрического поля промышленной частоты ($T_{пр}$) вычисляется по формуле:

$$T_{пр} = 8 \cdot \left(\frac{t_{E1}}{T_{E1}} + \frac{t_{E2}}{T_{E2}} + \dots + \frac{t_{En}}{T_{En}} \right), \quad (4.1)$$

где $t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$ – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью E_1, E_2, \dots, E_n , ч;

$T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{En}$ – допустимое время пребывания для соответствующих контролируемых зон, ч.

По данным, полученным от ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан, на расчистку трасс и осмотр одного пролета тратится до 60 мин. времени.

Надо отметить и тот фактор, что вдоль ВЛЭП 500 кВ, проходящих по юго-западной части Республики Таджикистан, до 70% распространены полукустарниковые, кустарниковые и травянистые массивы такие как:

- субальпийские разнотравные степи с высотами: горицвета 10-20 см, котовник – 25 см, полынь эстрагон до 1 м, мятлик до 60 см, тонгонок – 30 – 40 см (в западной части);

- низкотравные с высотами: трищетинник – до 50 см, эгилопс – до 45 см, асрагал – до 40 см (в южной части).

Таким образом, при ведении работ вдоль ВЛЭП 500 кВ линейный персонал не экранируется растительными массивами, поскольку известно, что растительные массивы могут уменьшить напряженность электрического поля промышленной частоты до 3 – 3,5 раза, если они превышают рост человека [1, 89].

Рассчитаем приведенное время пребывания персонала для рисунка 4.4 при температуре окружающего воздуха плюс 45 °С.

Согласно рисунку 4.4 линейный персонал от опоры до опоры без учета зон, где не наблюдается превышение ПДУ (для данных лиц), проходит следующие расстояния, подвергаясь воздействию различных значений напряженности ЭП ПЧ превышающего ПДУ:

- зоны от 5 до 10 кВ/м, $L=26$ м;
- зоны от 10 до 15 кВ/м, $L=63$ м;
- зоны от 15 до 20 кВ/м, $L=78$ м;
- зоны от 20 до 25 кВ/м, $L=32$ м;
- зоны 25 кВ/м и выше, $L=6$ м.

Время пребывания в этих зонах составит:

- зона от 5 до 10 кВ/м, $t_E = 0,08$ час;
- зона от 10 до 15 кВ/м, $t_E = 0,208$ час;
- зона от 15 до 20 кВ/м, $t_E = 0,3$ час;
- зона от 20 до 25 кВ/м, $t_E = 0,08$ час;
- зона 25 кВ/м и выше, $t_E = 0,003$ час.

При таком перемещении вдоль пролета суммарное время пребывания линейного персонала в перечисленных зонах составит 40 мин.

Как видно из – за высокой температуры окружающего воздуха и сложного рельефа местности вдоль данного пролета наблюдаются участки, где напряженность ЭП ПЧ превышает 25 кВ/м.

Определяем допустимые длительности пребывания в каждой зоне при существующих в них напряженностях по формуле:

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (4.2)$$

где E – напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м;

T – допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч.

С учетом того, что различие в уровнях напряженности ЭП контролируемых зон устанавливается в 1 кВ/м, то для данного пролета необходимо рассчитать время пребывания персонала в зонах от 5 до 24 кВ/м.

Определяем время пребывания в каждой зоне по формуле (4.2):

Зоны от 5 до 10 кВ/м	Зоны от 10 до 15 кВ/м	Зоны от 15 до 20 кВ/м	Зоны от 20 до 25 кВ/м
$T_{E1} = \frac{50}{6} - 2 = 6,3 \text{ ч};$	$T_{E6} = \frac{50}{11} - 2 = 2,55 \text{ ч};$	$T_{E11} = \frac{50}{16} - 2 = 1,13 \text{ ч};$	$T_{E16} = \frac{50}{21} - 2 = 0,38 \text{ ч};$
$T_{E2} = \frac{50}{7} - 2 = 5,14 \text{ ч};$	$T_{E7} = \frac{50}{12} - 2 = 2,16 \text{ ч};$	$T_{E12} = \frac{50}{17} - 2 = 0,94 \text{ ч};$	$T_{E17} = \frac{50}{22} - 2 = 0,27 \text{ ч};$
$T_{E3} = \frac{50}{8} - 2 = 4,25 \text{ ч};$	$T_{E8} = \frac{50}{13} - 2 = 1,85 \text{ ч};$	$T_{E13} = \frac{50}{18} - 2 = 0,77 \text{ ч};$	$T_{E18} = \frac{50}{23} - 2 = 0,17 \text{ ч};$
$T_{E4} = \frac{50}{9} - 2 = 3,6 \text{ ч};$	$T_{E9} = \frac{50}{14} - 2 = 1,57 \text{ ч};$	$T_{E14} = \frac{50}{19} - 2 = 0,63 \text{ ч};$	$T_{E19} = \frac{50}{24} - 2 = 0,08 \text{ ч};$
$T_{E5} = \frac{50}{10} - 2 = 3 \text{ ч};$	$T_{E10} = \frac{50}{15} - 2 = 1,33 \text{ ч};$	$T_{E15} = \frac{50}{20} - 2 = 0,50 \text{ ч};$	$T_{E20} = \frac{50}{25} - 2 = 0 \text{ ч};$

Рассчитываем приведенное время:

$$T_{\text{пр}} = 8 \cdot \left(\frac{0,08}{6,3} + \frac{0,08}{5,14} + \frac{0,08}{4,25} + \frac{0,08}{3,6} + \frac{0,08}{3} + \frac{0,208}{2,55} + \frac{0,208}{2,16} + \frac{0,208}{1,85} + \frac{0,208}{1,57} + \frac{0,208}{1,33} + \frac{0,3}{1,13} + \frac{0,3}{0,94} + \frac{0,3}{0,77} + \frac{0,3}{0,63} + \frac{0,3}{0,5} + \frac{0,08}{0,38} + \frac{0,08}{0,27} + \frac{0,08}{0,17} + \frac{0,08}{0,08} \right) = 37,63 \text{ ч}.$$

Следовательно, за фактическое время пребывания линейного персонала в указанных зонах (0,67 ч) биологическое воздействие электрического поля промышленной частоты эквивалентно воздействию на персонал электрического поля напряженностью 5 кВ/м в течение 37,63 ч. Как уже отмечалось, приведенное время не должно превышать восьми часов.

Аналогичным образом для других температур окружающего воздуха (рисунки 4.2-4.4) было рассчитано приведенное время в зонах действия ЭП ПЧ. Результаты расчетов приведены в таблицах 4.1 – 4.3.

Таблица 4.1 – Расчётное приведенное время пребывания линейного персонала в зонах действий электрических полей промышленной частоты при $t = + 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

		Зоны действия ЭП ПЧ, кВ/м при $t = + 45\text{ }^{\circ}\text{C}$			
		5÷10	10÷15	15÷20	20÷25
Ровный рельеф местности	t_E , час	0,17	0,25	0,08	0
	$T_{пр}$, час	9,28			
Пересеченный рельеф местности	t_E , час	0,23	0,05	0	0
	$T_{пр}$, час	2,77			

Таблица 4.2 – Расчётное приведенное время пребывания линейного персонала в зонах действий электрических полей промышленной частоты при $t = + 33\text{ }^{\circ}\text{C}$

		Зоны действия ЭП ПЧ, кВ/м при $t = + 33\text{ }^{\circ}\text{C}$			
		5÷10	10÷15	15÷20	20÷25
Ровный рельеф местности	t_E , час	0,2	0,22	0	0
	$T_{пр}$, час	6,5			
Подъем линии в гору	t_E , час	0,4	0,05	0,05	0
	$T_{пр}$, час	7,69			

Таблица 4.3 – Расчётное приведенное время пребывания линейного персонала в зонах действий электрических полей промышленной частоты при $t = + 27\text{ }^{\circ}\text{C}$

		Зоны действия ЭП ПЧ, кВ/м при $t = + 27\text{ }^{\circ}\text{C}$			
		5÷10	10÷15	15÷20	20÷25
Ровный рельеф местности	t_E , час	0,17	0,25	0	0
	$T_{пр}$, час	2,82			
Подъем линии в гору	t_E , час	0,2	0,067	0	0
	$T_{пр}$, час	3			

Согласно данным таблицы 4.1 (ровный рельеф местности) видно, что при температуре окружающего воздуха плюс $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведенное время пребывания персонала в зоне действия ЭП ПЧ превышает допустимые 8 ч. Лишь при пересеченном рельефе местности (таблица 4.1) значение приведенного времени находится в допустимых пределах.

Учитывая, что ВЛЭП 500 кВ проходящая по юго-западной части, в основном охватывает площадь с рельефом местности схожим с рисунком 4.4, при температуре плюс 45 °С приведенное время будет превышать 8 ч.

Согласно таблицам 4.2-4.3 приведенное время пребывания линейного персонала в зонах действиях ЭП ПЧ при температурах окружающего воздуха равных плюс 27°С и плюс 33°С не превышает 8 ч. Однако при температуре окружающего воздуха плюс 27°С приведенное время пребывания линейного персонала в зонах действия данных полей относительно температуры плюс 33°С в среднем в 2,5 раза меньше.

С учетом сказанного работу по расчистке трасс от кустарников, имеющих в юго-западной части территории Республики Таджикистан, предлагается проводить с начала сентября до середины октября, так как было отмечено выше, что в эти месяцы температура окружающего воздуха в местах прохождения ВЛЭП 500 кВ не превышает плюс 27°С.

Таким образом, при ведение работы вдоль ВЛЭП 500 кВ при температуре окружающего воздуха равной плюс 27°С один линейный электромонтёр за день может расчистить до трех пролетов с суммарным приведенным временем пребывания в зоне действия ЭП ПЧ не более 8 ч.

Благоприятный период для ведения работы при температуре окружающего воздуха + 27°С составляет 32 дня (с сентября до середины октября без учета выходных), что составляет 256 часов рабочего времени. Для расчистки трассы (533 пролета) от кустарников для бригады, состоящей из 10 линейных электромонтёров, необходимо 18 рабочих дней (с учетом того, что за день данная группа может расчистить 30 пролетов).

Таким образом, с использованием расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ можно организовать работу по расчистке трасс так, что в течение рабочего времени линейный персонал не наберёт 8ч приведенного времени пребывания в зонах превышения ПДУ.

Применение расчетных карт позволяет проводить осмотр ВЛЭП 500 кВ находясь в зоне с напряженностью не более 5кВ/м.

Осмотр ВЛЭП 500 кВ – осмотр линии электропередачи напряжением 500 кВ вдоль пролетов с использованием карт распределения напряженности электрического поля можно проводить следующими способами:

- находясь в зоне электрического поля, где напряженность не превышает ПДУ;
- удаляясь от проекции крайнего провода (в зависимости от рельефа местности) на расстояние, при котором $E \leq 5$ кВ/м, используя при этом для осмотра бинокли;
- используя приборы тепловизионного контроля и малую авиацию.

Ниже на рисунках 4.5 – 4.6 приведены поперечные диаграммы распределения напряженности электрического поля для наиболее характерных участков рисунки 4.2 – 4.4.

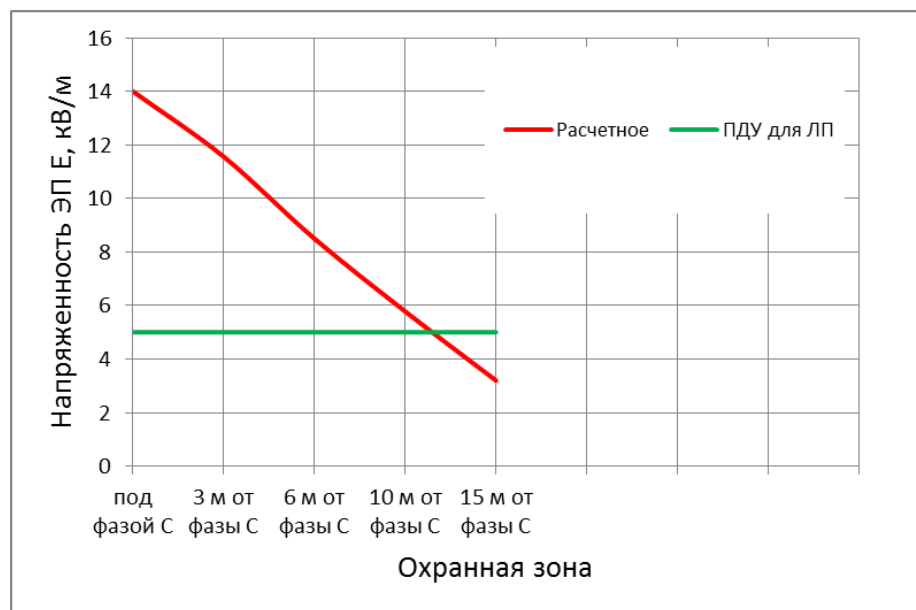


Рисунок 4.5– Поперечная диаграмма распределения напряженности электрического поля промышленной частоты в охранной зоне (подъем линии в гору; $t=+ 27^{\circ}\text{C}$)

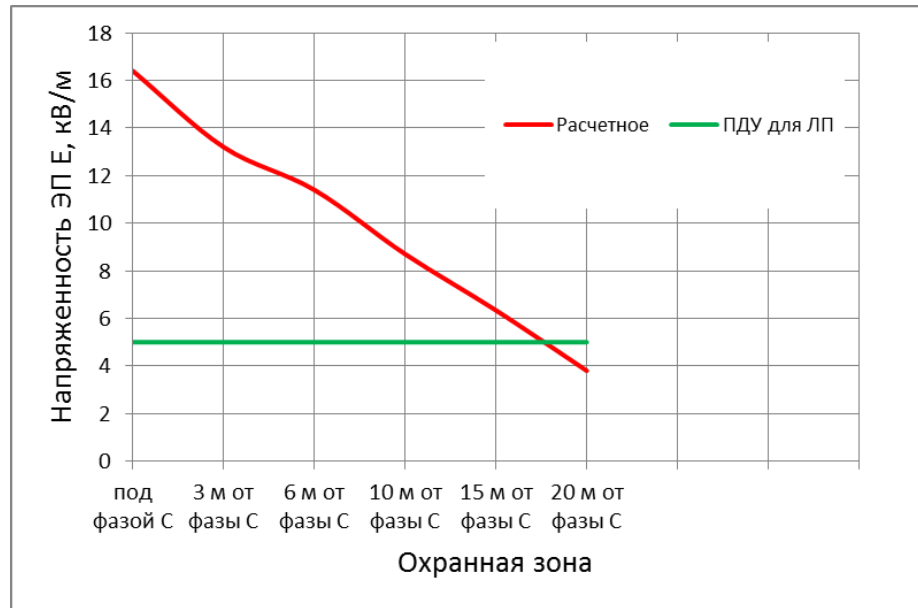


Рисунок 4.6 – Поперечная диаграмма распределения напряженности электрического поля промышленной частоты в охранной зоне (подъем линии в гору; $t=+ 33^{\circ}\text{C}$)

Согласно рисункам 4.5–4.6 предлагается организовать осмотр трасс вдоль ВЛЭП 500 кВ таким образом (удаляясь от проекции фазы крайнего провода в зависимости от рельефа местности и температуры окружающего воздуха), чтобы линейный персонал всегда находился вне зоны влияния электрического поля ($E < 5 \text{ кВ/м}$) и при необходимости использовал бинокль для осмотра элементов ВЛЭП 500 кВ. Использование же малой авиации и приборов тепловизионного контроля для осмотров [92], учитывая экономическое состояние ОАХК «Барки Точик», на данный момент нецелесообразно. Однако с учетом того, что согласно проекту CASA–1000 будет строиться продолжение ЛЭП 500 кВ, связывающее север Таджикистана с югом Кыргызстана, а также юг Таджикистана с севером Афганистана, в дальнейшем применение малой авиации (беспилотники) может быть наиболее удобным, учитывая и климатические условия, и сложный рельеф местности Таджикистана.

4.3 Оценка эффективности внедрения проекта организации работ при обслуживании линий электропередачи напряжением 500 кВ с учетом условий Республики Таджикистан

На основании построенных расчетных карт и правильном подборе деревьев или кустарников (в зависимости от климатических условий), размещенных на границах санитарно-защитных зон, можно увеличить площади плодородных земель, исключив при этом негативное влияние ЭП ПЧ на население.

Известно, что абрикосы обыкновенные (местные сорта), гранат обыкновенный (местные сорта) а также яблоня домашняя (местного сорта) обладают способностью экранировать электрическое поле и существенно уменьшать значение его напряженности.

Физическая сущность защитного действия заключается в том, что листья деревьев имеют высокую проводимость, а корни деревьев находятся в земле. С учётом того, что население, ведущее сельскохозяйственные работы вблизи охранной зоны, будет находиться за этими деревьями, высота которых выше роста человека, эти посадки будут экранировать электрические поля, создаваемыми линиями 500 кВ.

При этом надо отметить, что на рост и вкус получаемых плодов электрическое поле не влияет, наоборот—увеличивается рост деревьев и размеры плодов.

За счет правильного использования растений на границе санитарно– защитной зоны ВЛЭП 500 кВ , можно увеличить площади для ведения сельскохозяйственных работ.

Такой подход приведет к совпадению размеров охранной и санитарно-защитной зон.

Предположим, что за счёт использования абрикоса обыкновенного (местного сорта), растущего в северной части Республики Таджикистан, уменьшим санитарно– защитную зоны с 38 м до 30 м вдоль пролёта за счёт снижения значений напряженности ЭП ПЧ. С учётом того, что средняя стоимость одной сотки земли

в юго-западной части Республики Таджикистан составляет от 500 до 700 долларов, а длина пролёта в данном случае равна 350 м, мы дополнительно получаем 2800 м² или 28 соток. Умножая данное значение на два (санитарно – защитная зона вдоль пролёта выделяется с двух сторон), получаем 56 соток. Умножив это значение на среднюю стоимость одной сотки земли получим в среднем 33, 6 тыс. долларов на один пролёт линии.

Аналогичным образом можно уменьшать размер санитарно– защитной зоны вдоль всех пролётов ВЛЭП 500 кВ, проходящих по территории Республики Таджикистан, увеличивая тем самым площадь земли для ведения сельскохозяйственных работ вблизи указанных линий.

4.4 Выводы

1. С использованием разработанной нами методики с шагом 1 м для всех пролетов линии 500 кВ (общее количество пролетов – 533), проходящей по юго-западной части Республики Таджикистан для различных температур окружающего воздуха (с шагом изменения температуры плюс 3°С) рассчитаны распределения напряженности электрических полей промышленной частоты.

2. На примере трех характерных пролетов с разным рельефом местности и температурой окружающего воздуха построены продольные диаграммы распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, которые показали, что при определенной температуре и ведении работ по расчистке охранной зоны не обеспечиваются требования нормативных актов, устанавливающих продолжительность приведённого времени.

3. Для уменьшения приведенного времени пребывания линейного персонала в зоне действия электрических полей промышленной частоты подобран благоприятный период для ведения работы (с начала сентября до середины октября) с температурой окружающего воздуха не превышающей плюс 27°С, при которой один линейный электромонтер может расчищать до 3-х пролетов с суммарным приведенным времени пребывания в зоне действия электрического поля промышленной ча-

стоты не более 8 ч.

4. Оценен экономических эффект, получаемый от введения в сельскохозяйственный оборот дополнительной площади плодородных земель при размещении на границах санитарно-защитных зон деревьев и кустарников (с учетом климатических условий), обеспечивающих защиту населения от воздействия электрических полей промышленной частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, состоящая в разработке предложений по защите линейного персонала, обслуживающего ЛЭП 500 кВ, обеспечивающих соблюдение требований нормативных актов по допустимой величине приведённого времени.

Выполненная работа позволяет сформулировать следующие основные результаты и выводы:

1. Разработана методика построения карт распределения напряженности ЭП ПЧ вдоль ВЛЭП 500 кВ с помощью вычислительного кластера, учитывающая топографию местности и температуру окружающего воздуха.

2. Результаты расчетных карт распределения напряженности ЭП ПЧ, построенных по разработанной методике, сопоставлены с результатами инструментальных исследований. Относительная погрешность построенных карт по разработанной методике не превысила 10 %.

3. Разработан и утвержден Открытой Акционерной Холдинговой Компанией «Барки Точик» Республики Таджикистан руководящий документ РД-1М-001-2014 «Построение карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ», регламентирующий методику построения карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ для определения зоны влияния электрических полей вдоль указанных линий с целью организации работ на линиях электропередачи напряжением 500 кВ, обеспечивающей защиту линейного персонала.

4. На основании расчетных карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ, проходящей по юго-западной части Республики Таджикистан, разработан проект организации работ при обслуживании ВЛЭП 500 кВ, позволяющий обеспечить приведенное время пребывания линейного персонала в зоне действия электрических полей промышленной частоты не более 8 ч.

5. Показано, что размещение на границах охранной зоны деревьев и кустарников, подобранных с учетом климатических условий, обеспечивает защиту населения от действия электрических полей промышленной частоты и позволяет дополнительно вовлечь в сельскохозяйственный оборот до 56 соток плодородной земли на один пролет ВЛ 500 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, Г.Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности [Текст] / Г.Н. Александров // Электричество. – 1981. – № 7. – С. 1–6.
2. Александров, Г.Н. О безопасности воздушных линий электропередачи переменного тока ультравысокого напряжения [Текст] / Г.Н. Александров, Т.В. Лисочкина, Т.В. Комисарчик // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1975. – № 5. – С. 46–50.
3. Александров, Г.Н. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции [Текст] / Г.Н. Александров, Г.А. Евдокунин, Г.В. Подпоркин // Электричество. – 1982. – № 4. – С. 10–17.
4. Александров, Г.Н. Растительные массивы как средство обеспечения экологической безопасности ВЛ [Текст] / Г.Н. Александров, В.А. Кашина, Т.В. Лисочкина // Энергетическое строительство. – 1993. – № 5. – С. 54–57.
5. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды [Текст] / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1989. – 360 с.
6. Анализ повреждений здоровья персонала электроустановок напряжением 500 кВ [Текст] / И.С. Окраинская, А.И. Сидоров, Э.М. Красильникова и др. // Электробезопасность. – 1997. – № 3–4. – С. 5–12.
7. Аполлонский, С.М. Расчеты электромагнитных полей: монография [Текст] / С.М. Аполлонский, А.Н. Горский; под ред. А.Н. Горского. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
8. Афанасьев Н.С. Использование тепловизоров для контроля состояния электрооборудования в Колэнерго [Текст] / Н.С. Афанасьев, А.Б. Власов, А.В. Джуря // Электрические станции. – 1994. – № 12. – С. 44–45.
9. Белицын, И.В. Влияние стрелы провеса провода воздушной линии электропередачи на параметры ЭМП [Электронный ресурс] / И.В. Белицын, А.В. Макаров // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, №

4: Энергетика. – [С. 56 – 60]. – Заглавие с титульного листа. – Электронная версия печатной публикации.

10. Белицын, И.В. Новый подход к определению охранной зоны воздушной линии электропередачи [Текст] / И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/2. – С. 20–25.

11. Белицын, И.В. Получение и анализ экспериментальных данных электрического поля воздушной линии электропередачи [Текст] / И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4/2. – С. 96–104.

12. Береговой, Г.Т. Безопасность космических полетов [Текст] / Г.Т. Береговой, А.А. Тищенко, Г.П. Шибанов, В.И. Ярполов и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 343 с.

13. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Физматгиз, 1962. – 372 с.

14. Влияние изменения температуры на напряжённость электрического поля под ВЛ-500 кВ [Текст] / М.В. Гареев, И.С. Окраинская, А.Б. Тряпицын, А.В. Коржов // Вклад молодых учёных и специалистов в развитие науки и культуры г. Челябинска. Состояние. Проблемы. Перспективы: сборник научных статей. – Челябинск: Изд-во УрГАФК, 2000. – Ч. 2. – С. 73–74.

15. Влияние электрического поля, линий электропередачи и подстанций высокого напряжения [Текст] / Сарма-Маравада, Хилтон-Каваллиус, Джао Тринх, Де Визо // Доклад № 36-04 на сессии СИГРЭ, 1976 г. / Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ – 76); под ред. Ю.П. Шкарина. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.

16. Влияние электрического поля, создаваемого электроустановками высокого напряжения переменного тока, на организм человека [Текст] / Т.И. Кривова, В.В. Луковкин, Ю.А. Морозов и др. // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. Вып. 108. – М.: Профиздат, 1977. – С. 33–39.

17. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду [Текст]: переводы докладов Международной конференции по большим электри-

ческим системам (СИГРЭ-84) / под ред. Ю.П. Шкарина, С.Я. Петрова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.

18. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду [Текст]: переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / под ред. Ю.П. Шкарина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.

19. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду (СИГРЭ-76) [Текст] / под ред. Ю.П. Шкарина. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.

20. Вычислительные методы в электродинамике [Текст] / под ред. Р. Митры; пер. с англ; под ред. Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. – 487 с.

21. Гареев, М.В. Система индивидуального учета уровня воздействия электрического поля на персонал межсистемных электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.В. Гареев. – Челябинск, 2001. – 108 с.

22. Гичев, Ю.П. Влияние электромагнитных полей на здоровье человека = Alleged health effects of electromagnetic fields: аналит. обзор [Текст] / Ю.П. Гичев, Ю.Ю. Гичев // СО РАН. ГПНТБ. – Новосибирск, 1999. – 91 с.

23. ГОСТ 12.0.002-80 ССБТ. Термины и определения (с изменениями № 1) [Текст] / Введ. 1980-09-30. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

24. ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Взамен ГОСТ 12.1.002 – 75; введ. 1986 – 01 – 01 [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 7 с.

25. ГОСТ 12.1.051 – 90. Электробезопасность. Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 3 с.

26. Гражданкин, А.И. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов [Текст] / А.И. Гражданкин // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 2. – С. 6–10.

27. Григорьев, Ю.Г. Человек в электромагнитном поле (существующая ситуация, ожидаемые биоэффекты и оценки опасности) [Текст] / Ю.Г. Григорьев // Ра-

диационная биология. Радиоэкология. – 1997. – № 4. – С. 690–702.

28. Гурвич, Е.Б. Смертность населения, проживающего вблизи энергообъекта электропередачи напряжением 500 кВ [Текст] / Е.Б. Гурвич, Э.А. Новохатская, Н.Б. Рубцова // Медицина труда и промышленная экология. – 1996. – № 9. – С. 23–27.

29. Дегтярев, В.В. Охрана окружающей среды [Текст] / В.В. Дегтярев. – М.: Транспорт, 1989. – 207 с.

30. Довбыш, В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: монография [Текст] / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара: Содружество, 2009. – 198 с.

31. Дикой, В.П. Способы снижения электрических полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи сверх- и ультравысокого напряжения [Текст] / В.П. Дикой, А.Ю. Токарский // Международная научно-практическая конференция “Экология энергетики 2000”, 18–20 октября 2000 г. Материалы конференции – М – Изд-во МЭИ – 2000 – с. 422–425.

32. Дикой, В.П. Тросовые экраны и их применение на ВЛ–500 кВ. Повышение эффективности работы энергосистем [Текст] / В.П. Дикой, А.Ю. Токарский, Н.Б. Рубцова, М.Ш. Мисриханов // Тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова – М – Энергоатомиздат – 2001 – с. 209–215.

33. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках [Текст] / П.А. Долин. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

34. Думанский, Ю.Д. Гигиеническая оценка электромагнитного поля, создаваемого высоковольтными линиями электропередачи [Текст] / Ю.Д. Думанский, В.М. Попович, Е.В. Прохватило // Гигиена и санитария. – 1976. – № 8. – С. 19–23.

35. Дьяков, А.Ф. О влиянии электрических и магнитных полей промышленной частоты на здоровье человека [Текст] / А.Ф. Дьяков, И.И. Левченко, О.А. Никитин и др. // Энергетик. – 1996. – № 11. – С. 4–5.

36. Дьяков, А.Ф. Электромагнитная обстановка и оценка влияния ее на человека [Текст] / А.Ф. Дьяков, И.И. Левченко, О.А. Никитин и др. // Электричество. – 1997. – № 5. – С. 2–10.

37. Дьяков, А.Ф. Экологически безопасные высоковольтные воздушные линии электропередачи компактной конструкции [Текст] / А.Ф. Дьяков, О.А. Никитин, А.Ю. Токарский // Электрические станции. – 1995. – № 1. – С. 64-70.
38. Зеленые насаждения как средство обеспечения экологической безопасности линий электропередачи [Текст] / Г.Н. Александров, В.А. Кашина, Т.В. Лисочкина, Г.В. Подпоркин // Электрические станции. – 1978. – № 5. – С. 71–75.
39. Зелениченко, А.С. Воздействие воздушных линий электропередачи на окружающую среду и учет его при проектировании [Текст] / А.С. Зелениченко, В.Г. Хотинский // Проектирование конструктивно-строительной части линий электропередачи и подстанций: сб. научн. трудов Энергосетьпроекта. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 4–15.
40. Зуев, В.Г. Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения [Текст] / В.Г. Зуев, В.И. Попов. – Воронеж, 1998. – 201 с.
41. Индивидуальные экранирующие комплекты для защиты от электромагнитных полей. Разработка, производство, поставка [Электронный ресурс]. – http://www.energoform.ru/ru_products_energy.html.
42. Кайданов, Ф.Г. Зарубежные оценки влияния воздушных линий сверх- и ультравысокого напряжения на окружающую среду [Текст] / Ф.Г. Кайданов, Н.Н. Тиходеев // Энергохозяйство за рубежом. – 1979. – № 5. – С. 1–5.
43. Кайданов, Ф.Г. Моделирование электрических полей для изучения их влияния на человека [Текст] / Ф.Г. Кайданов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – № 1. – С. 123–133.
44. Кац, Р.А. Расчёт электрического поля трехфазной линии электропередачи [Текст] / Р.А. Кац, Л.С. Перельман // Электричество. – 1978 – № 1. – С. 16–19.
45. Кирикова, О.В. Защита от электромагнитных полей [Текст] / О.В. Кирикова. – М.: Мир, 1992. – 234 с.
46. Колечицкий, Е.С. Расчет электрических полей / Е.С. Колечицкий. – М.: МЭИ, 1977. – 81 с.
47. Колечицкий, Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения [Текст] / Е.С. Колечицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

48. Комплексная оценка уровня безопасности технологических процессов и оборудования [Текст]: тематический сборник. – Тбилиси, 1977. – 173 с.
49. Кривова, Т.И. Влияние электрического поля, создаваемого электроустановками высокого напряжения переменного тока, на организм человека [Текст] / Т.И. Кривова, В.В. Луковкин, Ю.А. Морозов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – 1977. – Вып. 108. – С. 33–39.
50. Кузина, А.И. Напряжённость электрического поля на линиях электропередачи и подстанциях 500 кВ [Текст] / А.И. Кузина // Энергетик. – 1973. – № 8. – С. 14–15.
51. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности [Текст] / В.Е. Манойлов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.: ил.
52. Медведев, В.Т. Травматизм, профзаболевания и показатели эффективности работы персонала предприятий электроэнергетики [Текст] / В.Т. Медведев, Ю.И. Жуков, А.М. Большунов, Е.И. Бибин, И.Б. Филиппова // Электричество. – 2008. – № 8. – С. 61–63.
53. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. ПОТ Р М – 016 – 2001, РД 153 – 34.0-03.150 – 00 [Текст]. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 216 с.
54. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок: ПОТ РМ-016–2001, РД 153-34.0-03.150 – 00 [Текст]. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 216 с.
55. Методические указания по контролю оборудования тепловизорами [Текст]. – Л.: ЛИПКЭН, 1990. – 57 с.
56. Механошин, Б.И. Система мониторинга состояния воздушных линий электропередачи [Текст] / Б.И. Механошин, В.А. Шкапцов // Электро. Серия: Эксплуатация. – 2006. – Вып. № 6. – С. 33–38.
57. Миролубов, Н.Н. Методы расчета электростатических полей [Текст] / Н.Н. Миролубов, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн, Н.Н. Тиходеев. – М.: Высшая школа, 1963. – 415 с.

58. Мисриханов, М.Ш. Ограничение уровня напряженности электрического поля ВЛ 500 кВ с помощью тросовых экранов [Текст] / М.Ш. Мисриханов, А.Ю. Токарский // Энергетик. – 2004. – № 10. – С. 13-15.

59. Морозов, Ю.А. Защита людей от воздействия электрического поля, создаваемого ВЛ сверхвысокого напряжения [Текст] / Ю.А. Морозов // Промышленная энергетика. – 1974. – № 9. – С. 23–27.

60. Никольский, В.В. Теория электромагнитного поля [Текст] / В.В. Никольский. – Изд – е 3-е. – М.: Высшая школа, 1964. – 384 с.

61. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / В.В. Никольский. – М.: Наука, 1973. – 608 с.

62. Номоконова, О.В. Применение нечетких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / О.В. Номоконова. – Челябинск, 2003. – 100 с.

63. Окраинская, И.С. Оценка профессионального риска по фактору «Электрического поля промышленной частоты» [Текст] / И.С. Окраинская // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Том 13. – №2. – С. 32–35.

64. Осика, Л.К. Способы учета изменения температуры по трассам линий электропередачи для уточнения их математических моделей [Текст] / Л.К. Осика // Электро. Серия: Исследования и разработки. – 2006. – Вып. № 6. – С. 27–29.

65. Перельман, Л.С. Электрическое поле электропередачи 1150 кВ с учетом опор и провисания проводов [Текст] / Л.С. Перельман, Л.Л. Войтехович // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1986. – № 6. – С. 76–82.

66. Поляков, В.С. Применение тепловизионных приемников для выявления дефектов высоковольтного оборудования [Текст] / В.С. Поляков // Методические указания по контролю оборудования тепловизорами – Л.: ЛИПКЭн, 1990. – 57 с.

67. Пospelова, Т.Г. Проблемы влияния воздушных линий на окружающую среду [Текст] / Т.Г. Пospelова // Энергетическое строительство. – 1989. – № 7. – С. 24–26.

68. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Текст]: СО 153 – 34.20.501 – 2003. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003.

69. Применение инфракрасной техники в энергетике. Выпуск 1, 1997. ОР-ГРЭС

70. РД № 34.03.604-81. Руководящие указания по защите персонала, обслуживающего распределительные устройства и воздушные линии электропередачи переменного тока напряжением 400, 500 и 750 кВ, от воздействия электрического поля: утв. 29.12.1980 Министерством энергетики и электрификации СССР.

71. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда: Р 2.2.2006-05 [Текст]: Введено в действие с 1 ноября 2005 г. / Издательство: «ДЕАН», 2006. – 239 с.

72. Руководящие указания по расчету проводов тросов воздушных линий электропередачи [Текст] . / Р.А. Голубцов, - М.: Издательство «Энергия», 1965. – 22 с.

73. Рубцова, Н.Б. Методические принципы гигиенической оценки электромагнитных полей промышленной частоты на рабочих местах персонала электросетевых объектов и их реализации [Текст] / Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский, Н.В. Лазаренко, Т.Г. Самусенко// Журнал «Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения РАМН». – 2006. – № 3. – С. 7-12.

74. СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях [Текст]. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003.

75. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200 – 03. Проектирование, строительство, реконструкция, и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных местности [Текст]. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003.

76. Сидоров, А.И. Руководящий документ как средства улучшения условия труда линейного персонала ОАХК «Барки Точик» [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Электробезопасность. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 35 – 43.

77. Сидоров, А.И. Выбор методики построения карт распределения напряженности электрического поля вдоль линии электропередачи напряжением 500 кВ в зависимости от рельефа местности [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАА, 2012. – Ч. VI. – С. 100–103.

78. Сидоров, А.И. Карты распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ, построенные в Ansys 13 с применением вычислительного кластера «СКИФ Аврора» [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LIII международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 173 – 177.

79. Сидоров, А.И. Методика исследования распределения электрического поля вдоль линии электропередачи 500 кВ [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 1. – С. 257–261.

80. Сидоров, А.И. Моделирование электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ в программе Ansys 13 с применением вычислительного кластера «СКИФ Аврора» [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров, Б.В. Севастьянов, Р.О. Шадрин // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Серия «Управления вычислительной техники и информатики». – 2014. – №1(61). – С 122 – 123.

81. Сидоров, А.И. Необходимость учета особенностей рельефа местности в зоне расположения ВЛЭП при разработке метода расчета электрического поля [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов V Международной научно-практической конференции: в 2 т. / под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – С. 231–233.

82. Сидоров, А.И. Обеспечение безопасности передачи электроэнергии в электрических сетях сверхвысокого напряжения [Текст] / А.И. Сидоров,

С.Ш. Таваров // Перспективы энергетики Таджикистана: материалы международной Республиканской научно-практической конференции. – Душанбе, 2011. – С. 92–94.

83. Сидоров, А.И. Оценка риска повреждения здоровья персонала ЭУ СВН по фактору электрическое поле [Текст] / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, Н.А. Шаврина // Сборник докладов девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС-2006. – СПб., 2006. – С. 590–594.

84. Сидоров, А.И. Построение карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ Республики Таджикистан [Текст] / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, С.Ш. Таваров // Вестник Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Серия «Энергетика». – 2014. – №1(25). – С. 56 – 59.

85. Сидоров, А.И. Построение карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // *Moderní vymoženosti vědy – 2014: materiály x mezinárodní vědecko-praktická konference (27 ledna – 05 února 2014 roku, Díl 38 Technické vedy)*. – Praha: Education and Science, 2014. – С. 64–67.

86. Сидоров, А.И. Построение карты напряженности электрического поля с учетом рельефа местности и температуры воздуха [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т.13. – №1 – С. 52 – 54.

87. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск, 1994. – 263 с.

88. Сидоров, А.И. Учет рельефа местности при построении карты напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500кВ [Текст] / А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров // Достижения науки–агропромышленному производству: материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАА, 2013. – Ч. 6. – С. 175–178.

89. Сидоров, А.И. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: монография / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская. – Челябинск: Изд-во: ЮУрГУ, 2008. – 204 с.

90. Скварцов, Е.А. Практика тепловизионного обследования линий электропередачи 110 – 330 кВ [Текст] / Е.А. Скварцов // Энергетик. – 2002. – № 7. – С.14–17.

91. Скуртова, И.В. Опасные и вредные производственные факторы, характеризующие работы на линиях электропередачи сверхвысокого напряжения [Текст] / И.В. Скуртова // Наука–производство–технологии –экология: сб. материалов Всероссийской научно–технической конференции. – Киров: ВятГУ, 2006. – Т. 4. – С. 117–122.

92. Скуртова, И.В. Повышение безопасности и безвредности при ведении работ по техническому обслуживанию линий электропередачи сверхвысокого напряжения: дис. ... канд. тех. наук [Текст] / И.В. Скуртова. – Челябинск, 2008. – 118 с.

93. ССБТ. ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.

94. Таваров, С.Ш. О методике построения карты напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ [Текст] / С.Ш. Таваров // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Выпуск 18. –№37(296). – С. 138–139.

95. Таваров, С.Ш. Проблемы, связанные с эксплуатацией линий напряжением 500 кВ Республики Таджикистан [Текст] / С.Ш. Таваров // Энергетика в современном мире: сборник статей VI Международной заочной научно-практической конференции (2–6 декабря 2013 г. / Забайкальский гос. ун-т.). – Чита: ЗабГУ, 2013. – С. 33–37.

96. Таваров, С.Ш. Оценка влияния рельефа местности на напряженность электрического поля под ЛЭП СВН. // сборник материалов III – й Всероссийской студенческой конференции (с международным участием) «Безопасность жизнеде-

тельность глазами молодежи». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С 105 – 107.

97. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ РД 34.20.504–94, СПО ОРГРЭС, 1996. – 82 с.

98. Тиходеев, Н.Н. Защита населения и персонала от влияния воздушных ЛЭП—1150 кВ [Текст] / Н.Н. Тиходеев // Энергетика и транспорт. – 1987. – № 3. – С. 152–157.

99. Токарский, А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электро-сетевых объектов: дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / А. Ю. Токарский. – Иваново, 2011. – 518 с.

100. Токарский, А.Ю. Оценка электромагнитных факторов, действующих на человека при эксплуатации высоковольтных установок [Текст] / А.Ю. Токарский, В.П. Дикой, Н.Б. Рубцова // Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование: сборник материалов Международного совещания (Москва, 18–22 мая 1998 г.); под ред. М.Х. Репачоли, Н.Б. Рубцовой, А.М. Муца. – Женева, 1999. – С. 101–126.

101. Токарский, А.Ю. Расчет электрического поля трехфазных линий электропередачи с учетом диэлектрических и проводящих свойств воздуха и грунта [Текст] / А.Ю. Токарский // Моделирование и автоматизация электрических систем. – Рига: Рижск. политехн. ин-т, 1979. – С. 52–60.

102. Тряпицын, А.Б. Безопасная организация работ на линиях напряжением 330 кВ и выше: дис. ... канд. тех. наук [Текст] / А.Б. Тряпицын. – Челябинск, 2002. – 132 с.

103. Цирель, Я.А. Применение приемников инфракрасного излучения для проверки контактов и изоляторов [Текст] / Я.А. Цирель, В.С. Поляков // Электрические станции. – 1976. – № 1. – С. 51–53.

104. Шаврина Н.А. Электромагнитная обстановка вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения : дис. ... канд. тех. наук [Текст] / Н.А. Шаврина. – Челябинск, 2007. – 128 с.

105. Юдин, В.В. Разработка и программная реализация эффективных численных методов электродинамического анализа антенн диапазона ОБЧ: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.В. Юдин. – Самара, 1997. – 212 с.
106. Deltuva, R. Protection against Electric Field in the Outdoor Switch-Gear Workplaces [Текст] / R. Deltuva, J. A. Virbalis // ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING. – 2011. – № 6(112). – P. 11–14.
107. Dušan, Medve. Modeling of Electromagnetic Fields Close to the Very High Voltage and Extra High Voltage Poles [Текст] / Medve Dušan // ELEKTROENERGETIKA. – 2012. – Vol. 5. – № 2. – P. 17–19.
108. Hoorfar, A. Electromagnetic Modeling and Analysis of Wireless Communication Antennas [Текст] / A. Hoorfar, V. Jamnejad // IEEE Microwave Magazine. – 2003. – Mar. – P. 51–67.
109. Hylten-Cavallius, N. Certain ecological effects of high voltage power lines [Текст]: IREQ Report № 1160 / N. Hylten – Cavallius // Cage Club Meeting. – Quebec City, 1975.
110. Silvester, P. Finite element solution of saturate magnetic field problems [Текст] / P. Silvester, M. Chari // IEEE Trans. Power Appar. Syst. – 1970. – Vol. 89. – № 7. – P. 1642–1651.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВДОЛЬ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 кВ

РД 1М-001-2014



«УТВЕРЖДАЮ»
 Технический директор
 ОАХК «Барқи Тоҷик»
 Умаров Н.Г.
 2014г.

ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ
 РУКОВОДЯЩЕГО ДОКУМЕНТА

Построение карт распределения напряженности электрического поля
 промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи
 напряжением 500 кВ

РД 1М-001-2014

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
 ОАХК «БАРҚИ ТОҶИК», г. Душанбе, Республика Таджикистан

Разработчик:
 Заведующий кафедрой БЖД
 ЮУрГУ (НИУ)
 д.т.н., профессор

Аспирант кафедры БЖД

А.И.Сидоров

С.Ш.Таваров



УТВЕРЖДАЮ
2014

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Дата введения 01.12. 2014 г.

Настоящий руководящий документ (РД) распространяется на воздушные линии электропередачи напряжением 500 кВ.

РД устанавливает методику построения карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ с помощью вычислительного кластера для определения зоны влияния электрических полей вдоль данных линий с целью организации работ на линиях электропередачи напряжением 500 кВ для защиты линейного персонала от воздействия электрических полей.

Сфера распространения РД – ОАХК «БАРКИ ТОЧИК», обслуживающий и эксплуатирующий воздушные линии электропередачи напряжением 500 кВ.

РД обязателен к применению.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На линейный персонал, занятый обслуживанием воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ, действует целый ряд вредных факторов. Наиболее значимым из них является напряженность электрического поля промышленной частоты. Для снижения риска повреждения здоровья линейного персонала от воздействия этого вредного фактора необходимо не только исследовать саму напряженность электрического поля и оценить, в каких пределах и в зависимости от каких факторов она изменяется, но и обеспечить, по возможности, минимальную экспозицию (продолжительность и интенсивность вредного фактора) нахождения персонала в зоне действия электрического поля.

Этого можно достичь построением карт распределения напряженности ЭП вдоль линии электропередачи 500 кВ, учитывая как рельеф местности, так и температуру окружающей среды.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для построения карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ необходимы исходные данные:

2.1. Из характеристик ВЛ:

2.1.1. Виды и типы опор воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ.

2.1.2. Марка и сечение проводов ВЛ–500 кВ.

2.1.3. Масса провода на 1 км.

2.1.4. Протяженность между пролётами опор, м.

2.1.5. Продольный профиль расстановки опор.

2.1.6. Высота подвеса проводов к изоляторам, м.

2.1.7. Стрела провеса провода, м.

2.2. Из вычислительного кластера и программного обеспечения:

2.2.1. Вычислительный кластер.

2.2.2. Программы (Solidworks 2013 и Mechanical APDL ANSYS 13).

2.3. По данным Агентства «Таджикстандарт»: температура окружающего воздуха, °С в день обслуживания линий электропередачи напряжением 500 кВ.

3. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ВЛЭП 500 КВ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

3.1. Для участков, где будут проводиться регламентные работы, с учетом рельефа местности и температурных условий моделируются пролеты ВЛ – 500 кВ.

3.2. Эскизы опор с фазными проводами и поверхности рельефа местности рисуются в пакетной программе Solidworks 2013.

3.3. Эскизы преобразуются из двухмерного вида в трехмерный.

Исходными данными для эскизов являются:

- профиль расстановки опор;
- вид и тип опор воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ;
- протяжённость пролётов ВЛ–500 кВ $l_{пр}$, м;
- эквивалентный радиус проводов фаз $r_э$, м.

3.4. Для построения модели рельефа местности и провеса проводов над землей в программе Solidworks 2013 по продольному профилю определяются:

- разности неоднородностей рельефа местности вдоль пролетов;
- стрелы провеса проводов вдоль пролёта – f_x , м;
- расстояния от поверхности земли до провода – H , м;
- средние расстояния провеса провода над землей – $H_{ср}$, м.

3.5. Последовательность преобразования двухмерной модели в трехмерную в программе Solidworks 2013 выполняется следующим образом:

- для преобразования проводов фаз из прямых линий в провода с эквивалентным радиусом круглого сечения используется функция бобышка «основание по траектории, равной длине пролетов, с вытягиванием от одной опоры к другой»;
- для преобразования рельефа местности и опоры из двухмерной в трехмерную используется функция «вытянутая бобышка / основание».

3.5. Построенные в программе Solidworks 2013 модели преобразуются в формат либо parasolid (*.x_t), либо IGES(*.igs) для дальнейшего импорта в программу Mechanical APDL (ANSYS 13), где и рассчитываются напряжённости электрического поля для выбранных пролётов.

3.6. Импортирование файлов в программу Mechanical APDL (ANSYS 13). При этом из модели исключаются опоры.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЗАГРУЗКИ ФАЙЛОВ В ПРОГРАММУ МЕCHANICAL APDL (ANSYS 13)

1. Открываем программу Mechanical APDL (ANSYS 13) (рисунок А.1) в разделе «Job Name и Working Directory», указываем место дальнейшего сохранения результатов с названием файла и нажимаем Run.

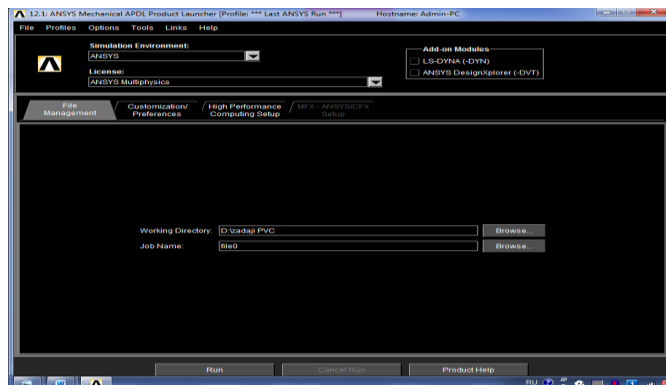


Рисунок А.1—Главный интерфейс программы Mechanical APDL (ANSYS 13)

2. Запускаем программу (рисунок А.2) для импортирования файла, нажимаем на File. Открываются закладки, выбираем из разделов раздел «import в import», выбираем тот файл, в котором сохранена наша модель, и указываем место, где сохранена наша модель в компьютере.

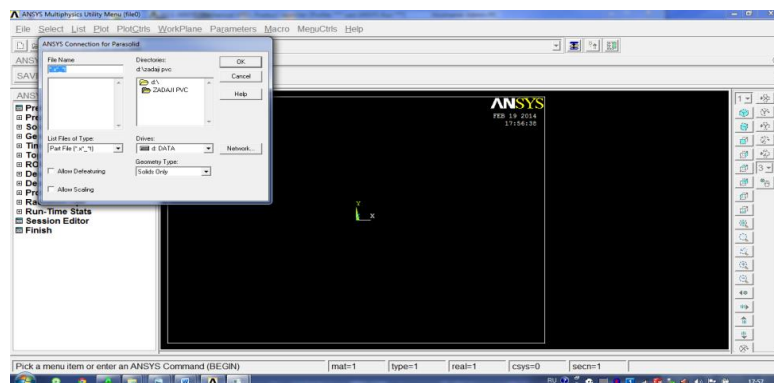


Рисунок А.2—Импортирование файла в программу Mechanical APDL (ANSYS 13)

3. В разделе preferences указываем тип решаемой задачи (electrostatic) (рисунки А.3).

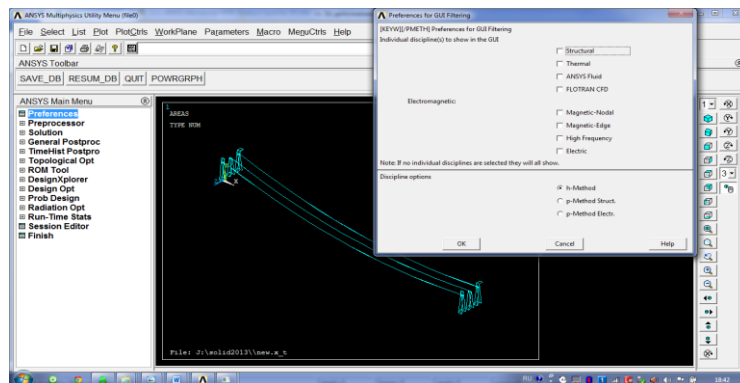


Рисунок А.3—Выбор в раздела preferences области решаемой задачи

4. В разделе «preprocessor» (рисунок А.4) задаём физические величины, пространство измерения и размеры сеток со следующей последовательностью. В разделе «preprocessor» открываем окно для указания пространства измерения, выбираем element type→add/edit/delete, нажимаем на add в открывшемся окне, выбираем electrostatic и указываем пространственные измерения (в данном случае выбираем 3D Tet 123).

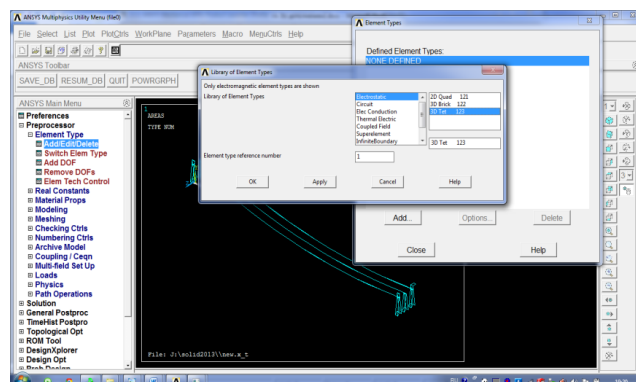


Рисунок А.4—Выбор в разделе «preprocessor» пространственного измерения

5. В разделе «Material Props →Material Models» (рисунок А.5) задаем константную величину относительной диэлектрической проницаемости воздуха ϵ .

6. В разделе «Meshing→MeshTool→Global→set» (рисунок А.6) указываем размерности сетки (размер сетки задаётся минимальным элементом модели).

7. В разделе «Loads→DefineLoads→Apply→Voltage» задаём напряжения на фазах и на поверхности земли.

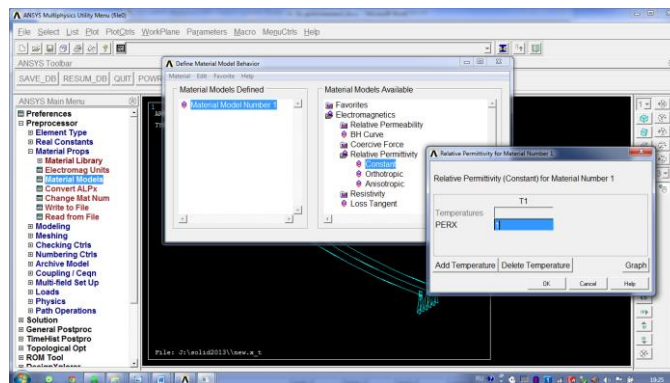


Рисунок А.5–Указание константных величин

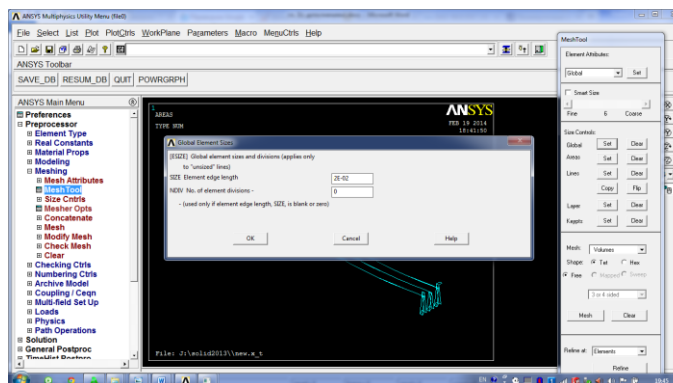


Рисунок А.6–Указание размерности сетки

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОЛЁТОВ ВЛ–500 кВ

ПРИМЕР

С учетом рельефа местности и температурных условий были смоделированы пролёты с пересечённым рельефом местности и при подъёме линии в гору.

Эскизы опор с фазными проводами и рельеф местности рисовались в пакетной программе Solidworks 2013.

За исходные данные для эскизов были приняты следующие:

- согласно профилю расстановки опор выбирались анкерно-угловые трехстоечные свободно стоящие опоры марки У–30 при подъёме линии в гору и ПБ–2 при пересечённом рельефе местности;
- длина пролёта при подъёме линии в гору принималась равной $l_{пр} = 350$ м, а при пересечённом рельефе местности – $l_{пр} = 240$ м;
- радиус проводов фаз рассчитывался как эквивалентный радиус. Значение эквивалентного радиуса для расщепленной фазы ВЛ 500 кВ с $n=3$ принималось равным $r_э = 13,4$ см.

Для построения моделей рельефа местности и провеса проводов над землей в программе Solidworks 2013 по продольному профилю определялись разности неоднородностей рельефа местности вдоль пролётов с шагом 20 м для пролета при подъёме линии в гору и с шагом 10 м для пролёта с пересечённым рельефом местности. Вычислялись стрелы провеса проводов – f_x , расстояния от поверхности земли до провода – H и средние расстояния провесов проводов над лей– $H_{ср}$, значения которых приведены в таблицах Б.1 – Б.2. Полученные значения использовались при построении моделей (рисунки Б.1–Б.3).

Ниже приведены результаты расчетов неоднородностей рельефа местности.

Пролет при подъёме линии в гору:

- перепад между опорами: $\Delta h = 469.67 - 453.87 = 15.8$ м;

- расстояние между опорами (длина пролета) 350 м.

Таблица Б.1—Значения f_x, H, H_{cp} в зависимости от неоднородности рельефа местности

$X, м$	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$f_x, м$	5.9	7.57	9.104	10.48	11.72	12.804	13.744	14.536	15.182
$H, м$	18.646	16.656	14.568	12.551	10.751	9.29	8.268	7.76	7.822
$H_{cp}, м$	18.065	16.949	15.931	15.01	14.188	13.464	12.838	12.309	11.879

продолжение таблицы Б.1

$X, м$	240	260	280	290
$f_x, м$	15.681	16.033	16.238	16.286
$H, м$	8.482	9.749	11.607	12.747
$H_{cp}, м$	11.546	11.31	11.174	11.143

Пролёт с пересечённым рельефом местности:

- перепад между опорами: $\Delta h = 448,7 - 449,8 = 1,1$ м;
- расстояние между опорами (длина пролета) 240 м.

Таблица Б.2—Значения f_x, H, H_{cp} в зависимости от неоднородности рельефа местности

$X, м$	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$f_x, м$	1,652	2,258	2,71	3,03	3,194	3,212	3,08	2,8	2,38
$H, м$	21,082	20,307	19,58	19	18,8	18,87	19,26	19,89	20,675
$H_{cp}, м$	20,89	20,49	20,18	19,98	19,87	19,85	19,94	20,128	20,41

На рисунке Б.1 представлена неоднородность рельефа местности.

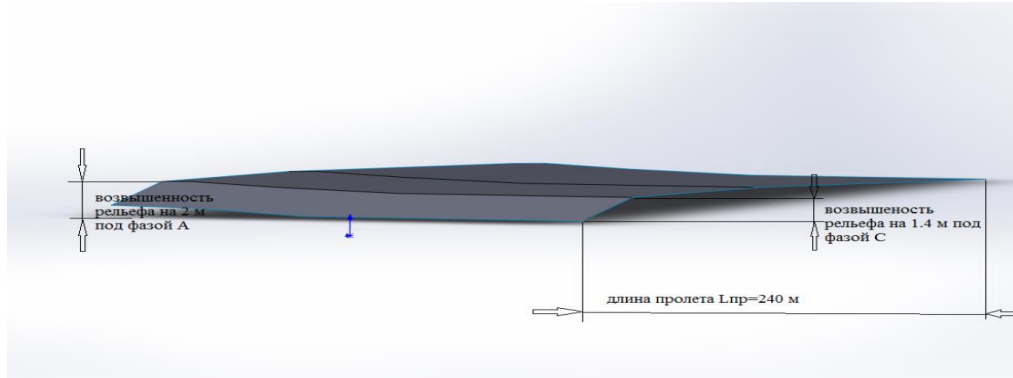


Рисунок Б.1– Неоднородность рельефа местности

После построения моделей по полученным данным, приведенным в таблицах Б.1–Б.2, двухмерную модель преобразовали в трехмерную. Последовательность преобразования в программе Solidworks 2013 выполнялась следующим образом:

- для преобразования проводов фаз из прямых линий в провода с эквивалентным радиусом круглого сечения использовалась функция бобышка «основание по траектории, равной длине пролетов с вытягиванием с одной опоры к другой»;
- для преобразования рельефа местности и опоры из двухмерной в трехмерную использовалась функция «вытянутая бобышка / основание» с площадями для пролета при подъеме линии в гору $S=200 \times 33 = 6600 \text{ м}^2$ и для пролета с пересеченным рельефом местности $S=130 \times 33 = 4290 \text{ м}^2$ без учета 60 м от опор.

Ниже на рисунках Б.2–Б.3 приведены трехмерные эскизы данных пролетов.

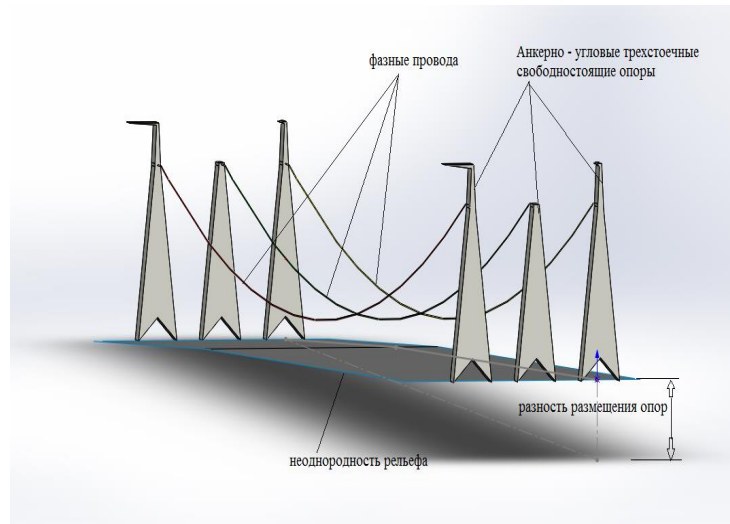


Рисунок Б.2—Пролет при подъёме линии в гору

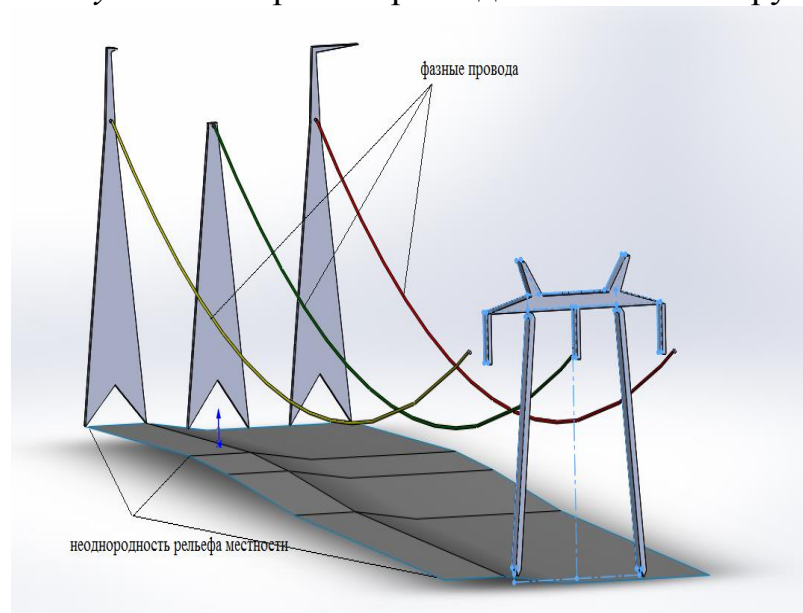


Рисунок Б.3 – Пролет линии при пересечённом рельефе местности

Построенные в программе Solidworks 2013 модели преобразовывались в формат либо parasolid (*.x_t), либо IGES (*.igs) для дальнейшего импорта в программу «Mechanical APDL (ANSYS 13)», где и рассчитывались напряженности электрического поля для выбранных пролётов.

КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПОСТРОЕННЫЕ ДЛЯ ПРОЛЁТОВ

ПРИМЕР

В программе «Mechanical APDL (ANSYS 13)» с использованием вычислительного кластера для полученных моделей пролётов вдоль линии ВЛ–500 кВ на расстоянии 1,8 м над уровнем земли были рассчитаны напряжённости электрического поля. Результаты расчётов приведены в таблицах В.1–В.2, а также приведены в виде диаграмм и карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ.

Учитывая тот факт, что в Республике Таджикистан используются те же Нормы и Правила, что и в Российской Федерации (но не в полном объёме), за допустимые значения напряженности электрического поля для линейного персонала выбираем те, что приведены в ГОСТе 12.1.002-84 и СанПиНе 2.2.4.1191-03.

Ниже, на рисунках В.1–В.2 для пролётов с разным рельефом местности представлены продольные диаграммы распределения напряженности электрического поля промышленной частоты под фазой С вдоль ВЛЭП 500 кВ с температурой окружающей среды, равной плюс 42°C.

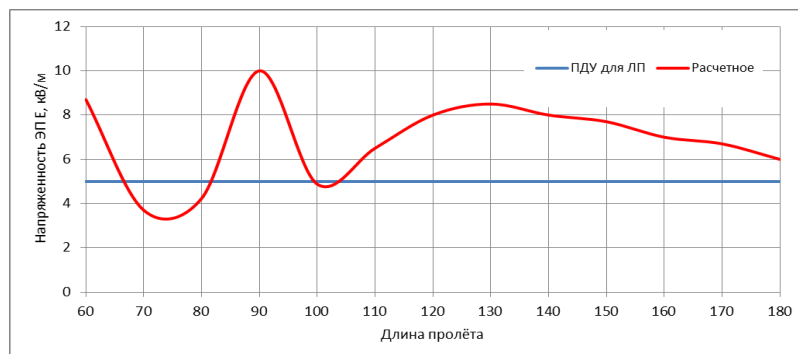


Рисунок В.1 – Продольная диаграмма распределения напряженности электрического поля промышленной частоты под фазой С вдоль ВЛЭП 500 кВ (пересеченный рельеф местности; $t=+42^{\circ}\text{C}$)

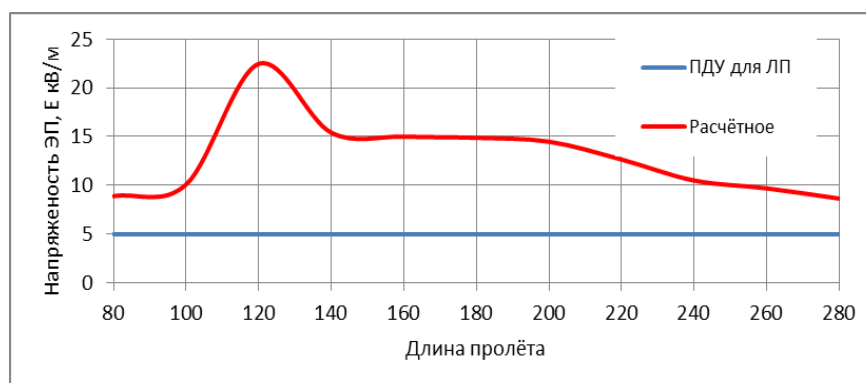


Рисунок В.2 – Продольная диаграмма распределения напряженности электрического поля промышленной частоты под фазой С вдоль ВЛЭП 500 кВ (подъёме линии в гору; $t=+ 42^{\circ}\text{C}$)

Из рисунков В.1 – В.2 видно, что с изменением рельефа местности и температуры окружающего воздуха напряжённость электрического поля вдоль пролётов изменяется в больших пределах и неравномерно, как это можно заметить, например, при ровном рельефе местности.

Из продольной диаграммы распределения напряженности электрического поля промышленной частоты с пересеченным рельефом местности (рисунок В.1) видно, что максимальное значение напряженности электрического поля наблюдается не в центре пролёта, а смещено на участок 90 м от опоры. Это связано с тем, что на данном участке наблюдается подъём поверхности земли, при этом при пересеченном рельефе местности напряженность электрического поля распределяется неравномерно. Заметно резкое уменьшение значений электрического поля на участке 75 м от опоры. Это обусловлено тем, что на данном участке наблюдается впадина на поверхности земли. Также на значение напряженности электрического поля вдоль пролёта большое влияние оказывает изменение температуры окружающего воздуха.

Если при пересеченном рельефе местности зона влияния электрического поля за счет изменения температуры окружающего воздуха увеличилась в среднем на 25 – 30% относительно температуры окружающего воздуха плюс 24°C , то при подъёме линии в гору эта зона увеличилась в среднем на 55%. Обусловлено это тем, что при подъёме линии в гору центр тяжести провода смещается, увеличивая приближение

проводов фаз к поверхности земли и тем самым увеличивая зону влияния электрического поля промышленной частоты.

По полученным результатам, приведенным в таблицах В.1–В.2 для двух пролётов, строим карты распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ (рисунки В.3 – В.4).

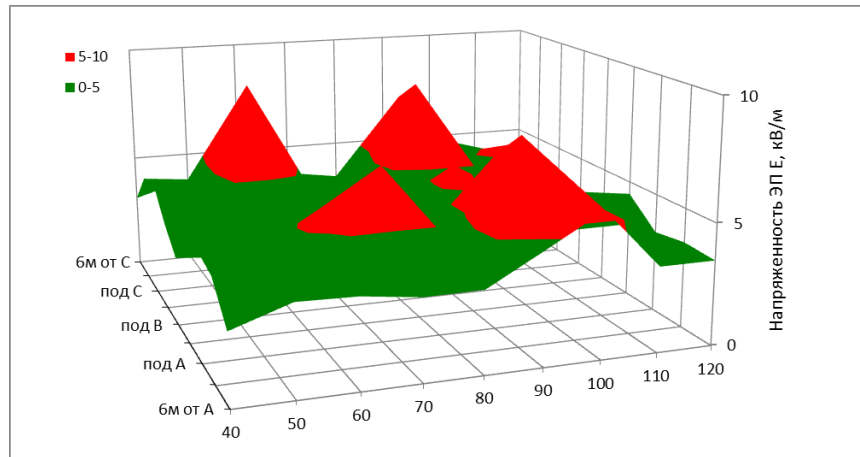


Рисунок В.3 – Расчетная карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (пересечённый рельеф местности; $t=+42^{\circ}\text{C}$)

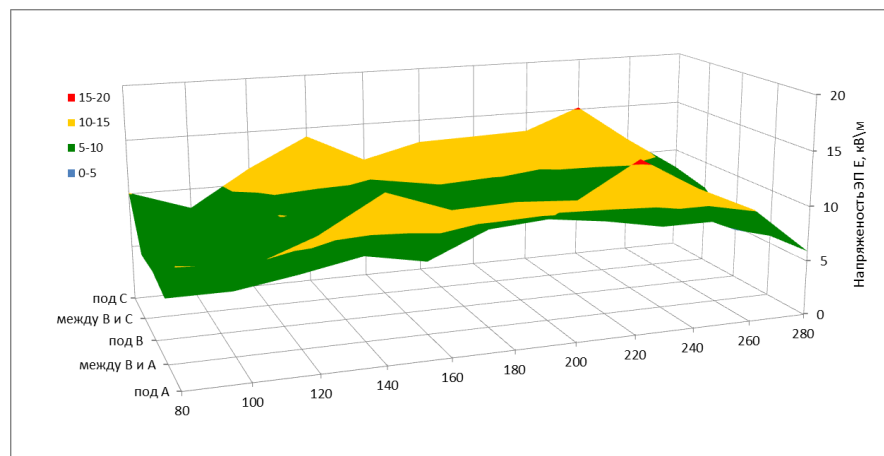


Рисунок В.4 – Расчетная карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ (подъём в гору; $t=+42^{\circ}\text{C}$)

Таблица В.1 Расчетные значения, полученные в программе «Mechanical APDL (ANSYS 13)» с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора–ЮУрГУ» (пересечённый рельеф местности)

Расстояние между опорами	6м от фазы С, кВ/м	3м от фазы С, кВ/м	под крайней фазой С, кВ/м	между фазами В и С, кВ/м	под средней фазой В, кВ/м	между фазами А и В, кВ/м	под крайней фазой А, кВ/м	3м от фазы А, кВ/м	6м от фазы А, кВ/м
40м	3,10	4,56	4,95	3,77	2,87	3,99	4,46	4,20	2,90
50м	3,79	4,28	4,34	3,50	2,66	3,34	3,92	3,40	3,70
60м	4,50	8,50	7,76	3,46	2,66	3,34	5,74	4,20	3,64
70м	3,70	4,20	3,70	2,32	3,12	3,30	7,20	4,00	3,34
80м	3,36	3,43	4,23	3,35	3,53	3,35	3,23	4,30	3,36
90м	4,44	7,52	8,52	4,42	5,80	4,42	7,32	8,52	4,64
100м	4,94	4,58	4,88	4,4	4,00	3,7	5,38	4,58	5,94
110м	3,50	4,59	5,39	3,47	4,25	4,77	4,39	4,59	3,50
120м	3,50	3,59	3,39	2,47	2,85	4,47	3,39	3,59	3,50

Таблица В.2 – Расчетные значения, полученные в программе «Mechanical APDL (ANSYS 13)» с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора–ЮУрГУ» (подъём линии в гору)

Расстояния между опорами	под крайней фазой С, кВ/м	между фазами В и С, кВ/м	под средней фазой В, кВ/м	между фазами А и В, кВ/м	под крайней фазой А, кВ/м
80м	10,10	5,92	3,70	5,70	10,20
100м	8,20	7,42	4,65	5,70	9,50
120м	11,52	8,80	10,10	6,56	11,52
140м	14,18	8,42	9,10	8,60	14,58
160м	11,52	8,68	8,65	8,56	12,64
180м	12,85	9,92	9,40	8,89	12,83
200м	13,00	9,30	10,00	9,30	12,50
220м	13,18	10,42	9,10	8,60	15,58
240м	15,18	7,82	9,20	7,60	12,58
260м	11,52	8,80	6,92	7,60	10,20
280м	8,20	7,42	4,65	5,70	5,92

Использование карт распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль ВЛЭП 500 кВ дает возможность изначально определить зоны влияния электрического поля промышленной частоты на линейный персонал и таким образом ограничить его нахождение в этой зоне согласно **СанПиНу 2.2.4.1191-03** в зависимости от значений электрического поля. Использование же индивидуальных средств защиты с учётом климатических условий Республики Таджикистан в летний период не всегда приемлемо. Это обусловлено тем, что индивидуальные комплекты изготавливаются из тонких металлических нитей и при температурах свыше плюс 25°C создают дискомфорт для персонала, использующего индивидуальные комплекты защиты.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	
2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	
3. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ВЛЭП 500 КВ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	