

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
ФГБОУ ВО РГУПС

На правах рукописи

Осипова Анна Ивановна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.9.3 Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Ю.И. Жарков

г. Ростов-на-Дону

2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 СИСТЕМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И НАДЁЖНОСТЬ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ.....	14
1.1 Постановка вопроса.....	14
1.2 Принципы и средства группового заземления опор контактной сети.....	16
1.3 Сопротивление и повреждения группового заземления, и их влияние на чувствительность релейной защиты и отключение короткого замыкания.....	18
1.4 Волоконно-оптические кабели с металлической оболочкой. Схемное и конструктивное исполнение.....	25
1.5 Выводы по главе.....	30
1.6 Цели и задачи исследований.....	31
Глава 2 ПРИНЦИПЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ВОЛС.....	32
2.1 Постановка вопроса.....	32
2.2 Схемы подключения металлической оболочки волоконно- оптической линии связи к тросу группового заземления опор и их варианты.....	33
2.3 Электрические режимы системы с дополнительным заземлением опор на металлическую оболочку ВОЛС.....	40
2.4 Электрические схемы замещения и расчётные режимы.....	44
2.5 Влияния гололёдных образований и меры по их устранению.....	47

2.6	Оценка повышения надёжности группового заземления опор с применением металлической оболочки ВОЛС	53
2.7	Выводы по главе.....	63
Глава 3	МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВОЛС.....	65
3.1	Постановка вопроса.....	65
3.2	Математическая модель режима короткого замыкания в контактной сети с дополнительным заземлением на металлическую оболочку ВОЛС.....	66
3.3	Программно-аппаратные средства моделирования.....	96
3.4	Исследования режимов короткого замыкания в межподстанционной зоне.....	104
3.5	Выводы по главе.....	106
Глава 4	ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВОЛС.....	107
4.1	Общие положения.....	107
4.2	Оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию.....	108
4.3	Оценка снижения потенциала прикосновения к опоре при коротком замыкании.....	123
4.4	Оценка повышения чувствительности релейной защиты за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания при использовании дополнительного заземления.....	131
4.5	Предполагаемые капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение двухуровневой системы группового заземления опор...	133
4.6	Выводы по главе	139
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты расчётов токов короткого замыкания.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты расчёта потенциала относительно точки A_2	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты расчёта потенциала относительно точки A_3 ...	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результат анализа изменения тока короткого замыкания..	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты внедрения.....	189

ВВЕДЕНИЕ

Согласно принципам Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1] основой социально-экономического роста страны является развитие и модернизация железнодорожной сети за счёт применения современных материалов и конструкций, разработки новых элементов инфраструктуры. Модернизация железнодорожной инфраструктуры необходима для развития в России тяжеловесного, скоростного и высокоскоростного движения поездов. Замена и модернизация оборудования касается всех хозяйств, включая хозяйство электроснабжения и увеличение пропускной способности цифровой технологической сети связи. Ещё одной ключевой задачей государства является повышение уровня безопасности функционирования железнодорожного транспорта.

Актуальность темы исследования. На электрифицированных железных дорогах имеют место короткие замыкания и режимы, действие которых может привести к аварийным режимам работы системы, выходу из строя оборудования. Чем быстрее произойдёт отключение повреждённого участка, тем меньше причинённый ущерб. Отключение повреждённых участков выполняется при помощи быстродействующих выключателей с автоматическими приводами, управление которых осуществляется при помощи релейной защиты.

К свойствам и функциям релейной защиты предъявляются требования, которые регламентируются нормативными документами [7]. Если защита функционирует правильно, то её действиями являются:

- срабатывание релейной защиты при коротком замыкании на объекте контроля в зоне защиты (внутреннее короткое замыкание);
- несрабатывание релейной защиты в защищаемой зоне при отсутствии короткого замыкания;
- несрабатывание релейной защиты, когда короткое замыкание произошло на не защищаемом участке (внешнее короткое замыкание).

Существует вероятность неправильной работы релейной защиты, называемое отказом её функционирования. В этом случае:

- отказ срабатывания – релейная защита не сработала при коротком замыкании в защищаемой зоне;
- ложное срабатывание – релейная защита сработала при отсутствии короткого замыкания на объекте защиты;
- излишнее срабатывание – релейная защита срабатывает при коротком замыкании за пределами защищаемой зоны.

При коротком замыкании отказ функционирования релейной защиты может привести к серьёзным последствиям таким, как повреждение электрооборудования, перегорев проводов контактной сети и др. Если отказ функционирования защиты происходит в нормальном режиме работы, то это приводит к отключению питания потребителей.

Чтобы релейная защита функционировала правильно, эффективно, ей необходимо обладать определёнными свойствами такими, как [7, 8]:

- селективность;
- надёжность;
- устойчивость функционирования. Чем дальше от источника питания происходит короткое замыкание, тем меньше ток удалённого короткого замыкания и чувствительность релейной защиты снижается.

Как известно, на участках постоянного тока, как и на участках переменного тока, все металлические части опор контактной сети, которые не находятся под напряжением, должны быть заземлены на рельс при помощи металлического прута. Это необходимо для повышения уровня электробезопасности людей, находящихся вблизи опоры, на которой произошло короткое замыкание.

Для участков постоянного тока это ещё и необходимо для того, чтобы снизить сопротивление петли короткого замыкания. Заземления бывают индивидуальные и групповые. На железной дороге получили применение групповые заземления, при которых группа опор объединяется металлическим

тросом, сопротивление которого выше сопротивления заземляющего проводника при индивидуальном заземлении и существенно влияет на значение сопротивления петли короткого замыкания, значительно его увеличивая. Тем самым затрудняя распознавание релейной защитой аварийной ситуации, так как удалённые токи короткого замыкания могут быть соизмеримы с максимальными токами нормального режима работы или быть даже меньше. В таком случае релейная защита может не распознать короткое замыкание.

Ещё одной причиной неправильного функционирования релейной защиты на участках постоянного тока являются пусковые токи электровозов, которые соизмеримы с удалёнными токами короткого замыкания и которые приводят к ложным срабатываниям релейной защиты [10].

Что касается электробезопасности, то при правильной работе группового заземления, когда все устройства исправны – заземляющие спуски присоединены к рельсу, трос группового заземления цел, искровые промежутки, диодные заземлители в рабочем состоянии, люди, находящиеся вблизи опоры, на которой произошло короткое замыкание, будут защищены. Но если, например, произойдёт обрыв троса группового заземления или нарушено соединение заземляющего спуска с рельсом, то группа опор, объединённых тросом группового заземления, окажется под напряжением, а человек, находящийся вблизи повреждённой опоры подвержен удару электрическим током.

Ложные срабатывания в системе постоянного тока приводят к износу коммутационного оборудования, перебою в электроснабжении, пережогу проводов контактной сети, снижению уровня электробезопасности, что в свою очередь ведёт к большим материальным потерям и несут угрозу жизни.

Внедрение в существующую систему группового заземления опор контактной сети дополнительного проводника, выполненного с помощью металлической оболочки оптоволоконного кабеля типа ОКГТ, позволит ему выполнять дублирующую функцию существующего троса группового заземления в случае нарушения работы группового заземления. Помимо того, что дополнительный проводник будет повышать надёжность системы группового

заземления, согласно законам электротехники, при параллельном положении проводников, эквивалентное сопротивление уменьшается, тем самым будет достигаться повышение токов короткого замыкания. И как следствие, увеличивается устойчивость функционирования релейной защиты путём отстроенности от нормального режима.

Также благодаря применению волоконно-оптического кабеля с металлической оболочкой типа ОКГТ возможно избежать деградации внешней оболочки кабеля из-за влияния электромагнитных полей линий СЦБ и продольного электроснабжения, горения сухой травы, воздействия некоторых птиц, например – пёстрых дятлов [28–31].

Таким образом, предложенное в диссертационной работе дополнительное заземление опор контактной сети с применением металлической оболочки ВОЛС позволит повысить токи короткого замыкания, тем самым улучшить устойчивость функционирования релейной защиты, несколько повысить надёжность системы группового заземления, но и позволит исключить деградацию оптических кабелей.

Степень разработанности темы исследования.

Существенный вклад в исследования вопросов повышения надёжности и эффективности функционирования устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока внесли разработки ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ) Марквардта К. Г., Косарева Б.И., Пупынина В.Н., Бадёра М.П., Шевлюгина М.В. и др.

Разработки ФГБОУ ВО РГУПС Фигурнова Е.П., Жаркова Ю.И., Кручинина В.П., Бочева А.С. и др.

Разработки АО «ВНИИЖТ» Котельникова А.В., Косарева А.Б., Марского В.Е., Добровольскиса Т.П., Зимакова В.А. и другие.

Разработки ФГБОУ ВО ПГУПС Буркова А.Т., Марикина А.Н., Васильева Ю.П. и др.

Разработки ФГБОУ ВО СамГУПС Митрофанова А.Н., Григорьева В.Л., разработки ФГБОУ ВО УрГУПС Ковалёва А.А., Кузнецова К.Б., Лесникова Д.В., и др.

ЗабИЖТ – филиал ФГБОУ ВО УрГУПС Филиппова С.А., разработки Новосибирского государственного университета Демиденко И.С., Трифонова Р.С., и др.

Исследованиями деградации самонесущих оптоволоконных кабелей, подвешенных на опорах железных дорог занимались сотрудники ФГБОУ ВО РГУПС Бочев А.С., Соловьёв Г.Е.

Исследованием возможности применения оптоволоконного кабеля типа ОКГТ в качестве экранирующего провода на железных дорогах переменного тока занимался Капкаев А.А.

Объектом исследования являются устройства контактной сети участка железной дороги постоянного тока.

Областью исследования является групповое заземление опор контактной сети.

Цель диссертационной работы заключается в повышении надёжности и безопасности работы участков железной дороги постоянного тока за счёт совершенствования системы группового заземления опор контактной сети.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи:**

1 Проанализировать работу системы группового заземления опор контактной сети и влияние параметров элементов этой системы на чувствительность релейной защиты и надёжность отключения коротких замыканий.

2 Разработать принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока, предполагающие использование металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны и усовершенствовать систему группового заземления опор.

3 Разработать математическую модель и выполнить моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

4 Оценить эффективность применения системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

Научная новизна диссертационной работы. На базе комплексного исследования и научного обобщения полученных результатов разработаны принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока железной дороги, а именно:

1 Разработаны принципы реализации системы группового заземления опор, отличающейся от традиционной наличием точек соединения троса группового заземления с металлической оболочкой ВОЛС, позволяющие снизить сопротивление петли короткого замыкания и потенциал прикосновения к опоре контактной сети при аварии.

2 Установлены расчётные соотношения между параметрами усовершенствованной системы группового заземления опор, параметрами тяговой сети участка электроснабжения и величиной токов короткого замыкания, на основании которых разработана математическая модель, используемая для расчёта уставок релейной защиты вдоль всей межподстанционной зоны.

3 Разработана эквивалентная схема замещения для расчёта показателей надёжности и выполнена оценка повышения надёжности усовершенствованной системы группового заземления опор контактной сети.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы:

Разработана математическая модель и выполнено моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя металлическую оболочку волоконно-оптических линий связи. Представленные теоретические положения позволяют определить способы расчёта токов короткого замыкания, учитывающие различные схемы питания контактной сети, различные способы подключения металлической оболочки ВОЛС.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

Предложена система двухуровневого группового заземления на металлическую оболочку ВОЛС на участках постоянного тока позволяющая:

1 Повысить чувствительность релейной защиты к удалённым коротким замыканиям за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания.

2 Снизить напряжение прикосновения к опорам контактной сети в момент КЗ, что повышает безопасность людей в зоне группового заземления опор.

3 Повысить надёжность отключения КЗ при обрыве троса группового заземления за счёт его дублирования металлической оболочкой ВОЛС.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, анализа, сравнения и модельного эксперимента.

Достоверность полученных результатов. Достоверность научных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается верификацией и высокой сходимостью результатов расчёта на компьютерной модели и данными модельного эксперимента, выполненного при помощи программного комплекса *MATLAB Simulink*.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует научной специальности 2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация:

– к п.1 «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава и систем тягового электроснабжения, повышение их эксплуатационной надёжности и работоспособности. Системы электроснабжения железных дорог, промышленного железнодорожного транспорта, рельсового городского транспорта и метрополитенов. Методы и средства снижения энергетических потерь, обеспечения энергетической безопасности тяги поездов и электроснабжения железных дорог»;

– к п. 4 «Совершенствование подвижного состава, включая тяговый привод и энергетические установки автономных локомотивов; тяговых и трансформаторных подстанций, тяговых сетей, включая накопители энергии, преобразователи, аппараты, устройства защиты системы тягового электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения, канализация обратного тока» –

представленная в работе двухуровневая система группового заземления опор контактной сети постоянного тока.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Принципы и способы организации группового заземления опор с использованием металлической оболочки волоконно-оптических линий связи.

2 Математическая модель и результаты моделирования режимов работы системы заземления опор с использованием в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

3 Оценка эффективности применения системы дополнительного заземления опор с использованием металлической оболочки ВОЛС.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2019);

– на Международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство" (Транспорт–2019) (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2019);

– на Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России" ("ТрансПромЭк–2019);

– на Всероссийской национальной научно-практической конференции Современное развитие науки и техники (Наука–2020) «Наука 2020» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2020);

– на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2020);

– на Международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство" (Транспорт–2020) (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2020);

- на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2021);
- на Международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство" (Транспорт–2021) (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2021);
- на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2022);
- на Международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство" (Транспорт–2022) (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2022);
- на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2022);
- на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2023);
- на Международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство" (Транспорт–2023) (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2023);
- заседаниях кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВО РГУПС (г. Ростов-на-Дону).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 19 научных работах, в том числе: 1 – входящая в международные реферативные базы данных и системы цитирования *Scopus*; 7 – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Структура и объём диссертации. Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, пяти приложений. Работа представлена на 192 страницах, содержит 129 страниц основного текста, 111 рисунков, 19 таблиц и 112 наименований библиографического списка, включая 1 наименование иностранного источника.

1 СИСТЕМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И НАДЁЖНОСТЬ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

1.1 Постановка вопроса

Система тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока представляет собой весьма сложную электрическую цепь с изменяемыми во времени параметрами. Эта особенность системы связана со спецификой работы железнодорожного транспорта – непрерывным изменением величины тяговой нагрузки, её перемещением и изменением числа потребителей электроэнергии. Для защиты этой сети от возможных повреждений, а также минимизации последствий коротких замыканий, перегрузок и прочих режимов на сегодняшний день применяется система релейной защиты, основная задача которой – надёжное и быстрое отключение повреждённых участков питающих линий [8]. Следует отметить, что особенностью релейной защиты является тот факт, что чем больше ток протекает при возникновении короткого замыкания, тем легче его обнаружить.

Одной из проблем, возникающих в работе релейной защиты тяговой сети постоянного тока, является сложность, а порой и невозможность определения факта возникновения удалённых коротких замыканий. Основные признаки, характерные для нормального режима работы участка железной дороги – ток фидера, изменение тока фидера, скорость нарастания тока фидера в ряде случаев мало отличаются от аналогичных параметров аварийного режима [8]. При значительной интенсивности движения данные параметры в нормальном режиме могут даже превосходить аналогичные параметры режима удалённого короткого замыкания. Такое положение дел приводит к образованию «мёртвых зон», в пределах которых релейная защита оказывается нечувствительна к возникновению аварийного режима.

Для решения обозначенной задачи в рамках данной работы предлагается рассмотреть меры, позволяющие повысить токи короткого замыкания на защищаемом участке, увеличить при этом надёжность функционирования систем связи прокладываемых вдоль полотна железных дорог. Речь идёт о волоконно-оптических линиях связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны. Подвеска таких линий началась в 90-х годах прошлого века, и выполнялась самонесущим волоконно-оптическим кабелем типа ОКСН. При очевидной простоте данного решения – кабель находится на недосягаемом для вандализма расстоянии, порядка семи метров над уровнем головки рельса, в процессе его эксплуатации возник ряд существенных проблем.



Рисунок 1.1 – Электротермическая деградация ВОЛС на линии СЦБ

Оказалось, что кабель подвержен негативному влиянию электромагнитного поля (Рисунок 1.1). Электрические поля переменного тока линий СЦБ и линий продольного электроснабжения приводили к электротермической деградации с последующим обрывом волоконно-оптического кабеля. Кроме этого, кабель оказался подвержен негативному влиянию температуры при горении сухой травы и камыша, также были выявлены разрастания волоконно-оптических линий,

вызванные воздействием на них некоторых видов птиц, в частности пёстрых дятлов [28–31].

Все перечисленные факты позволили дать предложения [43] по подвеске на сети железных дорог в качестве волоконно-оптического кабеля – кабель типа ОКГТ, внешней оболочкой которого является металл.

В диссертационной работе предлагается рассмотреть возможность использования внешней оболочки кабеля ОКГТ в качестве дублирующего пути тока короткого замыкания на электрифицированных дорогах постоянного тока.

Результаты исследований опубликованы [49–52, 54, 55].

1.2 Принципы и средства группового заземления опор контактной сети

В настоящее время в целях обеспечения электробезопасности все металлические конструкции опор контактной сети подлежат защитному заземлению. Одним из способов заземления, которому посвящена данная работа, является заземление группы опор контактной сети на рельс.

Защитное заземление опор контактной сети выполняется присоединением заземляющего спуска к средней точке дроссель-трансформатора или к рельсовой цепи. Согласно инструкции ЦЭ–191 [33] на сети железных дорог постоянного тока разрыв в цепи заземления выполняется посредством включения диодных заземлителей, искровых промежутков или диодно-искровых заземлителей.

Заземление бывает индивидуальным и групповым. При индивидуальном заземлении заземляющий проводник располагается на каждой опоре и присоединяется к рельсу. Этот заземляющий проводник обладает весьма малым, если сравнивать с другими элементами, сопротивлением, которое не ограничивает ток короткого замыкания. В случае, если заземляющий проводник отсутствует, то ток короткого замыкания протекает по телу опоры, сопротивление которой достаточно большое, что может привести к несрабатыванию релейной защиты. В

то же время, электрическая дуга, которая возникает при коротком замыкании, пережигает провода, а шаговое напряжение, возникающие вблизи опоры – опасно для людей, находящихся около опоры.

Отличие группового заземления опор от индивидуального заключается в объединении группы опор одним тросом – называемым тросом группового заземления (ТГЗ). В одной группе опор должны быть включены только железобетонные или только металлические опоры контактной сети. ТГЗ располагается с полевой стороны опор. Трос группового заземления, соединяет ряд стоящих опор и применяется для опор контактной сети, установленных на перегонах, в выемках за кюветами и на пассажирских платформах (Рисунок 1.2).

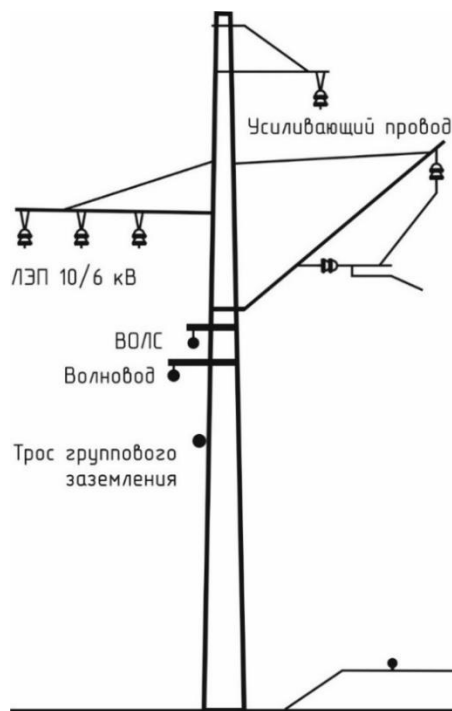


Рисунок 1.2 – Расположение питающих и заземлённых проводов на опоре

Согласно [33] на участках с изолированными стыками для исключения влияния на работу СЦБ, трос группового заземления разделяется на секции. На бесстыковых участках железной дороги такая проблема отсутствует. Существуют две схемы подключения ТГЗ – это Т-образная и Г-образная схемы [33].

На участках железных дорог постоянного тока принята максимальная длина троса группового заземления, которая не должна превышать при Т-образной схеме

подключения 1200 м (2 х 600) для железобетонных и 600 м (2 х 300) для металлических опор, а при Г-образной схеме – соответственно 600 м для железобетонных опор и 300 м для металлических опор (Рисунок 1.3).

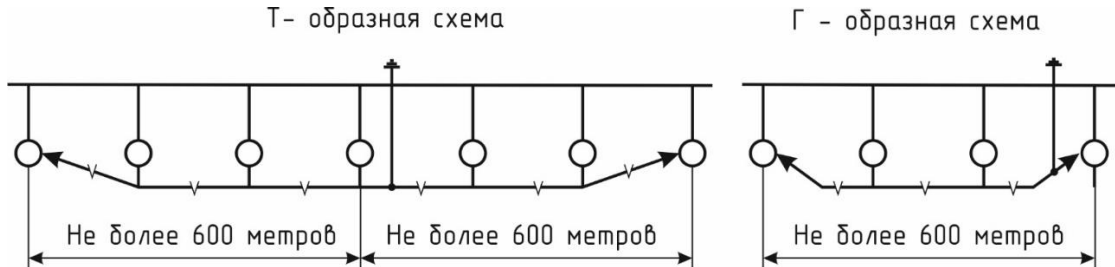


Рисунок 1.3 – Заземление опор контактной сети

В качестве самого троса на сегодняшний день на сети дорог постоянного тока применяются провода АС–50, ПБСМ–70, ПБСА–50/70, ПС–95 или другой с большей площадью сечения. Существующая система группового заземления не лишена недостатков. В случае повреждения заземляющего спуска в результате естественной коррозии или намеренного отсоединения его от рельса, вся система становится неработоспособной. Группа опор оказывается отсоединенной от заземлителя, в результате чего при аварии возможна ситуация, когда ряд опор окажутся под напряжением, опасным для жизни человека. Также может произойти обрыв троса группового заземления, при котором часть группы опор отсоединяется от рельса.

1.3 Сопротивление и повреждения группового заземления, и их влияние на чувствительность релейной защиты и отключение короткого замыкания

Как указывалось ранее, система группового заземления опор предназначена для того, чтобы при возникновении контакта токоведущих частей с арматурой опоры контактной сети ток КЗ стекал не по опоре в землю, разрушая последнюю и создавая опасность для находящихся поблизости людей, а замыкался через

металлические проводники на рельсовую цепь. Рассмотрим элементы, составляющие сопротивление петли короткого замыкания при аварии на контактной сети. Для простоты будем полагать, что нелинейный элемент цепи короткого замыкания – электрическая дуга отсутствует, и мы имеем дело с глухим коротким замыканием на металлическую часть опоры, это позволит исключить из рассуждения элемент, сопротивление которого меняется в широких пределах.

На Рисунке 1.4 представлена схема протекания тока КЗ, при этом ток в рельсовом пути и земле объединим в один и направим его по рельсам. Показанная схема составлена для случая, когда на участке применяется одностороннее питание контактной сети.

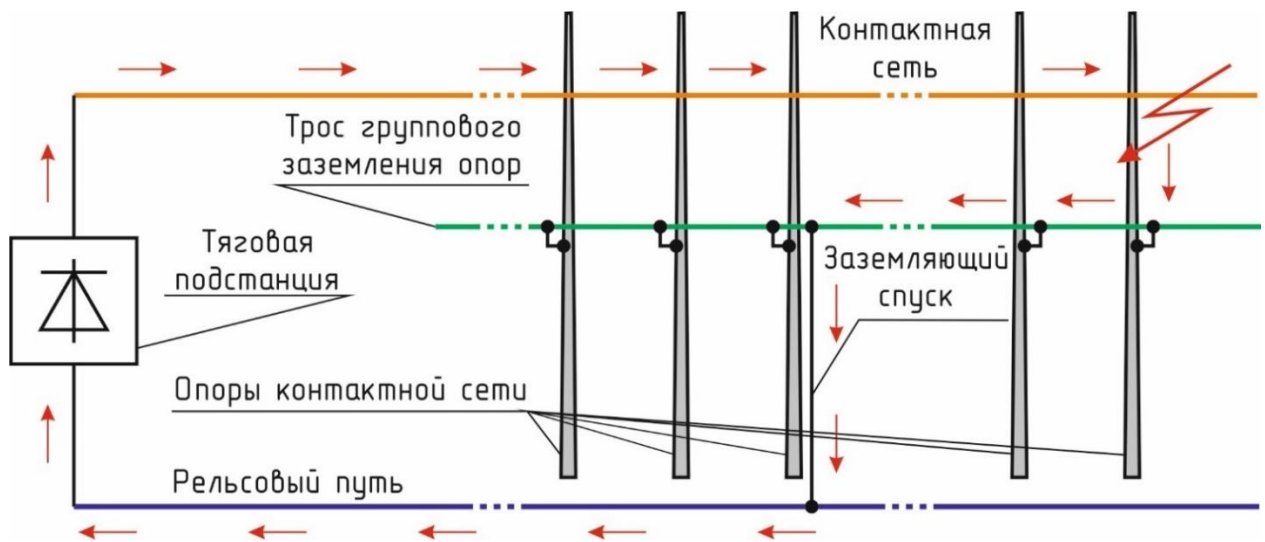


Рисунок 1.4 – Путь протекания тока короткого замыкания при аварии в системе с тросом группового заземления опор контактной сети

Как следует из представленной схемы протекания тока, на величину тока короткого замыкания оказывают влияние сопротивления следующих элементов:

- троса группового заземления опор, R_T ;
- рельсов, от места присоединения заземляющего спуска до подстанции, R_p ;
- сопротивление тяговой подстанции, в которое входят сопротивления трансформаторов, преобразовательных агрегатов и внешней энергосистемы, $R_{ТП}$;
- сопротивление контактной сети, $R_{КС}$;

- переходное сопротивление в точке короткого замыкания, $R_{\text{пер}}$.

Учитывая вышесказанное, а также тот факт, что все эти элементы соединяются последовательно, сопротивление петли короткого замыкания можно описать выражением:

$$R_{\text{кз}} = R_{\text{T}} + R_{\text{P}} + R_{\text{ТП}} + R_{\text{КС}} + R_{\text{пер}}. \quad (1.1)$$

Рассмотрим вклад каждой составляющей в итоговое значение сопротивления петли короткого замыкания. Как было сказано ранее, в качестве троса группового заземления применяются провода АС–50, ПБСМ–70, ПБСА–50/70, ПС–95 или другой с большей площадью сечения. Используя выражение (1.2), определим сопротивление R_{T} , полагая что короткое замыкание произошло на конце участка группового заземления опор. Результаты представим в Таблице 1.1.

$$R_{\text{T}} = \rho \cdot \ell, \quad (1.2)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом/км;

ℓ – расстояние от точки короткого замыкания до заземляющего спуска, км.

В рассматриваемом случае принимаем $\ell = 0,6$ км.

Таблица 1.1 – Сопротивление троса группового заземления

	АС–50	ПБСМ–70	ПБСА–50/70	ПС–95
Удельное сопротивление, (Ом/км)	0,65	0,925	0,55	1,7
Сопротивление участка ТГЗ, R_{T} (Ом)	0,36	0,555	0,33	1,02

На электрифицированных железных дорогах в настоящее время применяются рельсы типа Р65, имеющие удельное сопротивление 1 километра пути при параллельном соединении двух ниток рельсов равное 0,0153 Ом/км [35]. Рассчитаем сопротивление R_p для случая, когда короткое замыкание произошло на первом от подстанции участке группового заземления и для случая, когда короткое замыкание произошло вблизи поста секционирования, на расстоянии порядка 10 км от тяговой подстанции, результаты приведены в Таблице 1.2. При этом положим, что расстояние между соседними конечными опорами участков группового заземления составляет 60 м.

Таблица 1.2 – Сопротивление рельсового пути

	Длина участка рельсового пути, км	Сопротивление R_p , Ом
Режим №1 – близкое КЗ	0,6	0,00924
Режим №2 – удаленное КЗ	$(1,2+0,06) \cdot 7 + 0,6 = 9,42$	0,144

Расчёт сопротивления тяговой подстанции постоянного тока будем вести по выражению, приведённому в [9]:

$$R_{ТП} = \rho + R_{cy} + R_{оф}, \quad (1.3)$$

где ρ – внутреннее сопротивление подстанции, Ом;

R_{cy} – сопротивление сглаживающего устройства, Ом;

$R_{оф}$ – сопротивление отсасывающего фидера, Ом.

Для расчёта внутреннего сопротивления подстанции применим выражение:

$$\rho = \frac{A \cdot X_* \cdot U_H}{(1 - A \cdot X_*) \cdot n_T \cdot I_H}, \quad (1.4)$$

где A – коэффициент относительного наклона внешней характеристики преобразовательного агрегата, принимаем равным 0,5 для шестипульсовых схем выпрямления и 0,26 для двенадцатипульсовых выпрямителей;

U_H – номинальное напряжение на шинах тяговой подстанции;

I_H – номинальный ток одного выпрямительного агрегата;

n_T – число одновременно работающих преобразовательных агрегатов;

X_* – суммарное индуктивное сопротивление, включённое в каждый из линейных проводов вторичных обмоток тягового преобразователя, выраженное в относительных единицах:

$$X_* = \frac{S_T \cdot n_T}{S_c} + \frac{(1 \pm \alpha_3) \cdot u_{кп} \cdot S_T \cdot n_T}{100 \cdot S_{П} \cdot n_{П}} + \frac{(1 \pm \alpha_3) \cdot u_{кт}}{100}, \quad (1.5)$$

где $u_{кп}$ – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, %;

$u_{кт}$ – напряжение короткого замыкания тягового трансформатора, %;

S_c – мощность короткого замыкания на шинах подстанции, МВ·А;

$S_{П}$ – номинальная мощность тягового трансформатора, МВ·А;

S_T – номинальная мощность понижающего трансформатора, МВ·А;

$n_{П}$ – число одновременно работающих понижающих трансформаторов;

α_3 – заводской допуск на величину напряжения короткого замыкания.

Задавшись рядом значений мощностей понижающих и тяговых трансформаторов, выполним расчёт сопротивления тяговой подстанции, полагая, согласно [8] значение $R_{cy} = R_{оф} = 0,02$ Ом. Результаты анализа представлены в Таблице 1.3.

Величина сопротивления элемента контактной сети зависит от типа применяемой контактной подвески и от расстояния до точки возникновения короткого замыкания.

На электрифицированных дорогах постоянного тока применяются различные типы контактных подвесок, в объёме диссертационной работы рассмотрим три типа – М120+МФ100, М120+2МФ100, М120+2МФ100+2А185.

Таблица 1.3 – Сопротивление тяговой подстанции

	$n_T = 1$ $n_{\Pi} = 1$	$n_T = 1$ $n_{\Pi} = 2$	$n_T = 2$ $n_{\Pi} = 1$	$n_T = 2$ $n_{\Pi} = 2$
Шестипульсовая схема выпрямления, $S_c = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$				
$S_T = 4660 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,343	0,305	0,236	0,197
$S_T = 13430 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,161	0,132	0,137	0,105
$S_T = 4660 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,313	0,290	0,205	0,182
$S_T = 13430 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,139	0,122	0,112	0,094
Двенадцатипульсовая схема выпрямления, $S_c = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$				
$S_T = 4660 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,192	0,174	0,137	0,119
$S_T = 13430 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,100	0,086	0,086	0,072
$S_T = 4660 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,178	0,167	0,123	0,112
$S_T = 13430 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ $S_H = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	0,089	0,081	0,075	0,067

Расчёт сопротивления элемента контактной сети будем вести по выражению:

$$R_{\text{КС}} = \rho_{\text{КС}} \cdot l_{\text{КЗ}}, \quad (1.6)$$

где $\rho_{\text{КС}}$ – удельное сопротивление контактной подвески, Ом/км;

$l_{\text{КЗ}}$ – расстояние от тяговой подстанции до точки короткого замыкания, км.

Изменяя расстояние до места аварии определим составляющую сопротивления контактной сети, результат представлен в Таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сопротивление контактной подвески, Ом

	Расстояние от тяговой подстанции		
	1 км	5 км	10 км
M120+MФ100	0,1023	0,5115	1,023
M120+2MФ100	0,0752	0,376	0,752
M120+2MФ100+2A185	0,0577	0,2885	0,577

Переходным сопротивлением в точке короткого замыкания при исследовании данного вопроса оперировать не будем, так как эта величина может изменяться в самых широких пределах, в диапазоне от нуля до десятка мегаом. Анализируя полученные результаты, сведём в Таблицу 1.5 граничные значения всех величин, входящих в выражение 1.1.

Таблица 1.5 – Сопротивление элементов петли короткого замыкания

	Минимум	Максимум	Среднее
R_T , Ом	0,33	1,7	1,015
R_p , Ом	0,00924	0,144	0,07662
$R_{ТП}$, Ом	0,067	0,343	0,205
$R_{КС}$, Ом	0	1,023	0,5115

На Рисунках 1.5 и 1.6 представлены средние и минимальные значения элементов, составляющих величину сопротивления петли короткого замыкания.

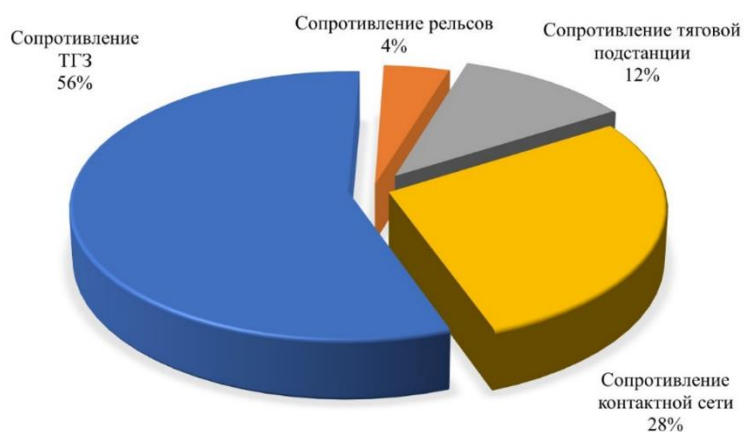


Рисунок 1.5 – Вклад каждого элемента в формирование итогового значения петли короткого замыкания (средние значения)

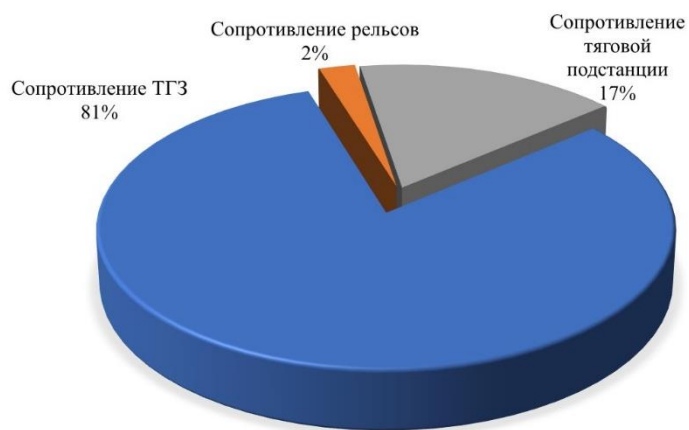


Рисунок 1.6 – Вклад каждого элемента в формирование итогового значения петли короткого замыкания (минимальные значения)

Как следует из проведённого исследования, ключевую роль в формировании сопротивления петли короткого замыкания играет сопротивление участка троса группового заземления. В случае повреждения ТГЗ либо при обрыве заземляющего спуска вся защищаемая группа опор окажется отключенной от рельсового пути, и ток будет стекать по опоре в землю. Сопротивление петли КЗ может возрасти многократно, в результате чего комплекс релейной защиты не сможет распознать и отключить аварийный участок.

1.4 Волоконно-оптические кабели с металлической оболочкой. Схемное и конструктивное исполнение

В диссертационной работе для повышения надёжности работы системы группового заземления опор контактной сети и устойчивости функционирования релейной защиты на участках железной дороги постоянного тока предлагается внедрение в систему группового заземления опор дополнительного проводника, используемого для организации пути обратного тока. Включение дополнительного проводника в существующую систему группового заземления позволит снизить сопротивление петли короткого замыкания, а как следствие, увеличить токи

короткого замыкания на удалённых участках, что приведёт к повышению чувствительности релейной защиты. В качестве дополнительного проводника предлагается использовать металлическую оболочку ОКГТ – оптоволоконного кабеля, вмонтированного в грозозащитный трос. Этот кабель предлагается применять на вновь сооружаемых либо реконструируемых участках электрифицированных железных дорог постоянного тока.

В настоящее время широкое применение на высоковольтных линиях электропередач получили оптоволоконные кабели ОКГТ встроенные в грозотрос [39, 40]. Отличие предлагаемого кабеля ОКГТ от применяемых в настоящее время на сети железных дорог оптических кабелей ОКСН, заключается в том, что его внешняя оболочка выполнена из сталеалюминевых повивов, внутри которых располагаются оптические каналы, что придаёт высокую надёжность кабелю (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Оптический кабель типа ОКГТ

Оптические кабели типа ОКГТ способны выдерживать большие механические и электрические нагрузки, они обладают высокой стойкостью к ударам молний и к вибрациям [39, 40].

Внешняя оболочка кабеля ОКГТ выполняется из следующих материалов:

- проволока стальная оцинкованная;
- проволока стальная с алюмоцинковым покрытием;

- проволока стальная плакированная алюминием, проволока из алюминиевого сплава. Оболочка из перечисленных материалов препятствует воздействию таких факторов, как раздавливание, изгиб, кручение, растяжение, длительное и кратковременное термическое воздействие, влага.

В настоящее время наибольшую распространённость получили следующие модификации оптоволоконного кабеля ОКГТ:

Кабель ОКГТ–Ц (С) – выполняется с центральным оптическим модулем из нержавеющей стали с уложенными внутри оптическими волокнами (ОВ), заполненным гидрофобным компаундом по всей длине, с одним или двумя слоями стальных и(или) алюминиевых проволок (Рисунки 1.8, 1.9).



1 – Оптическое волокно; 2 – Оптический модуль из нержавеющей стали, заполненный гидрофобным гелем; 3 – Повив стальных проволок, плакированных алюминием и/или проволок из алюминиевого сплава

Рисунок 1.8 – Оптический кабель типа ОКГТ–Ц



1 – Оптическое волокно; 2 – Оптический модуль из нержавеющей стали, заполненный гидрофобным гелем; 3 – Алюминиевая оболочка стального модуля; 4 – Повив стальных проволок, плакированных алюминием и/или проволок из алюминиевого сплава

Рисунок 1.9 – Оптический кабель типа ОКГТ–Ц
(с модулем, покрытым алюминиевой оболочкой)

ОКГТ–с (S) – исполнение с центральным силовым элементом из стальной проволоки, вокруг которого скручены стальные и (или) алюминиевые проволоки и(или) стальные трубки, с уложенными внутри ОВ и заполненными гидрофобным компаундом по всей длине, с одним или двумя повивами стальных и (или) стальных и алюминиевых проволок (Рисунок 1.10).



1– Стальная проволока, плакированная алюминием; 2 – Оптическое волокно;
 3 – Оптический модуль из нержавеющей стали, заполненный гидрофобным гелем; 4 – Стальные проволоки, плакированные алюминием и/или проволоки из алюминиевого сплава

Рисунок 1.10 – Оптический кабель типа ОКГТ–с

Отдельные компоненты кабеля соединяются при помощи специальных муфт, которые могут быть как диэлектрическими, так и обеспечивающими надёжную гальваническую связь между металлическими компонентами оптоволоконного кабеля, что позволяет получить цельнометаллический проводник с большим сечением, который расположен вдоль всего железнодорожного пути [45].

Для соединения строительных длин кабеля ОКГТ применяются металлические стыковочные муфты типа МОПГ. Преимущество стыковочных муфт типа МОПГ заключается в возможности соединения разнородных типов кабелей, в частности, диэлектрического ОКСН и проводящего ОКГТ через изолированную муфту. На Рисунке 1.11 представлена соединительная муфта МОПГ–МП–1/216–6КТ3645–К ССД, которая рассчитана для режимов организации плавки гололёда на кабелях ОКГТ [45]. Конструкция данной муфты предусматривает изоляцию металлического тела муфты от кабеля ОКГТ.

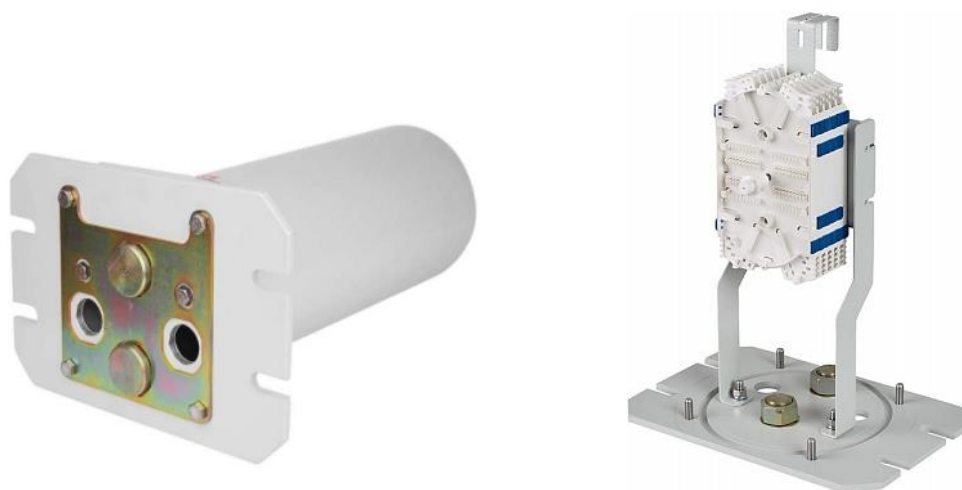


Рисунок 1.11 – Муфта МОПГ–МП–1/216–6КТ3645–К ССД

Отличительной особенностью кабеля типа ОКГТ является его защищённость от внешнего воздействия электромагнитного поля питающих линий. Стальные проводники являются ферромагнитным материалом, надёжно защищающим оптические волокна кабеля от воздействия магнитных полей, что позволяет говорить об отсутствии влияния эффекта Фарадея. Токи, наводимые в ОКГТ переменными электромагнитными полями линий СЦБ незначительны, и, кроме этого, эти токи протекают таким образом, что образуемые ими трубки тока оказываются параллельны линии распространения света в световодах. Следовательно, вектор напряжённости магнитного поля будет направлен по нормали к оси распространения светового луча, а следовательно результирующая напряжённость поля будет равна нулю. Влияние эффекта Керра на процесс передачи информации по ОКГТ также следует исключить. Внутри любого проводящего тела напряжённость электрического поля равна нулю, так как она компенсируется перераспределяемыми зарядами проводящего тела.

При прочих достоинствах кабеля типа ОКГТ следует учитывать тот факт, что при протекании по нему токов неизбежно будет выделяться тепло, нагревающее всю структуру кабеля. Наличие оптических волокон в структуре кабеля накладывает определённые ограничения на максимальную температуру и ограничивают её 85 градусами Цельсия [73]. В случае превышения этого значения может наблюдаться деградация оптических волокон, что приведёт к ухудшению

характеристик канала связи, вплоть до полного его разрушения. В Таблице 1.6 проведём сравнение режимов работы кабелей ОКСН и ОКГТ:

Таблица 1.6 – Сравнение режимов работы кабелей ОКСН и ОКГТ

№	Технический фактор	Тип кабеля	
		ОКСН (диэлектрический)	ОКГТ (проводящий)
1	Допустимое растягивающее усилие	до 35 кН	до 80 кН
2	Необходимость заземления	-	+
3	Подвеска на изоляторе	-	+
4	Тип соединительной муфты	МТОК	МОПГ
5	Возможность соединения разнородных кабелей в соответствующей муфте	-	+
6	Необходимость плавки гололёда	-	+
7	Влияние температуры	-	+

1.5 Выводы по главе

В рамках исследуемой в диссертационной работе темы для решения поставленной цели были рассмотрены применяемые в настоящее время заземления опор контактной сети, и установлено, что существенный вклад в значение сопротивления элементов петли короткого замыкания вносит удельное сопротивление троса группового заземления опор контактной сети. Особенно остро это явление выражено на участках железной дороги постоянного тока, удалённых от тяговой подстанции. Высокое удельное сопротивление троса группового заземления снижает величину токов короткого замыкания до значений, при которых аппаратура релейной защиты не может их отличить от токов нормального режима.

В главе выполнен сравнительный анализ характеристик самонесущего оптического кабеля ОКСН с предлагаемым оптоволоконным кабелем с металлической оболочкой типа ОКГТ. Изучены различные модификации оптоволоконного кабеля ОКГТ.

1.6 Цели и задачи исследований

Целью исследования, выполняемого в рамках диссертационной работы, является повышение надёжности и безопасности работы участков железной дороги постоянного тока за счёт совершенствования системы группового заземления опор контактной сети.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1 Проанализировать работу системы группового заземления опор контактной сети и влияние параметров элементов этой системы на чувствительность релейной защиты и надёжность отключения коротких замыканий.

2 Разработать принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока, предполагающие использование металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны и усовершенствовать систему группового заземления опор.

3 Разработать математическую модель и выполнить моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

4 Оценить эффективность применения системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

2 ПРИНЦИПЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ВОЛС

2.1 Постановка вопроса

Применение металлической оболочки волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ в системе электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока позволит расширить возможности тяговой сети, применяемой в настоящее время. Дополнительный проводник, прокладываемый по опорам контактной сети с полевой стороны, может быть использован кроме своего основного предназначения ещё для ряда полезных решений, повышающих надёжность и безопасность перевозочного процесса.

Как было показано выше, в Главе 1 данной работы, предлагается использование металлической оболочки данного проводника в качестве дополнительного пути протекания электрического тока системы группового заземления опор контактной сети. Существующую в настоящее время систему группового заземления предлагается усовершенствовать с целью снижения величины сопротивления цепи обратного тока, протекающего в аварийных режимах при коротком замыкании токоведущих частей контактной сети на арматуру опор контактной сети.

Кабели типа ОКГТ имеют значительное отличие в конструктивном исполнении по сравнению с обычными стальными и сталеалюминевыми тросами, применяемыми на сети электрифицированных железных дорог. Кроме основного отличия – наличия в своей структуре оптических волокон, сопротивление кабеля ОКГТ может в значительной степени изменяться, и величина удельного сопротивления ОКГТ имеет весьма широкий диапазон [39, 40]. Такая особенность кабеля позволяет использовать в качестве линии связи кабели со сравнительно небольшим удельным сопротивлением, что позволит снижать сопротивление цепи обратного тока короткого замыкания более эффективно.

Для реализации поставленной задачи необходимо рассмотреть возможные схемы подключения металлической оболочки волоконно-оптической линии связи к тросу группового заземления опор контактной сети, определив при этом наиболее целесообразный вариант по условиям работы в штатном режиме, когда существующая система группового заземления исправна и в вынужденном режиме, при различных повреждениях в системе. Принятая в результате анализа схема подключения металлической оболочки ВОЛС к ТГЗ должна быть проанализирована на предмет возможных электрических режимов работы, в том числе и при повреждении существующей цепи группового заземления опор. На следующем этапе для каждого электрического режима работы предлагаемой системы необходимо составить электрическую схему замещения и определить её расчётные режимы.

Введение в электрическую цепь дополнительного проводника, представляющего собой волоконно-оптический кабель и выполняющего функцию дублирующего пути обратного тока короткого замыкания очевидно скажется на показателях надёжности всей системы группового заземления опор в целом, в связи с этим в работе будет выполнен анализ расчётных показателей надёжности существующей и предлагаемой систем группового заземления опор контактной сети. Результаты исследований опубликованы [57, 58, 62, 63, 70, 71].

2.2 Схемы подключения металлической оболочки волоконно-оптической линии связи к тросу группового заземления и их варианты

При проектировании двухуровневой системы заземления возможны различные варианты организации дополнительных точек соединения троса группового заземления с металлической оболочкой ВОЛС. Для определения наиболее эффективного решения проанализируем сильные и слабые стороны наиболее целесообразных вариантов.

Первый вариант соответствует случаю, когда заземляющий спуск присоединяется к металлической оболочке ВОЛС, и уже получившийся узел соединяется с рельсовой цепью. Соединения осуществляются через диоды и искровые промежутки. Ввиду того, что при аварии искровой промежуток перекрывается здесь и на всех последующих схемах он не показан. Рассмотрим работу системы. При возникновении короткого замыкания диоды $VD1$ и $VD2$ открываются, диоды $VD3$ и $VD4$ закрыты (Рисунок 2.1).

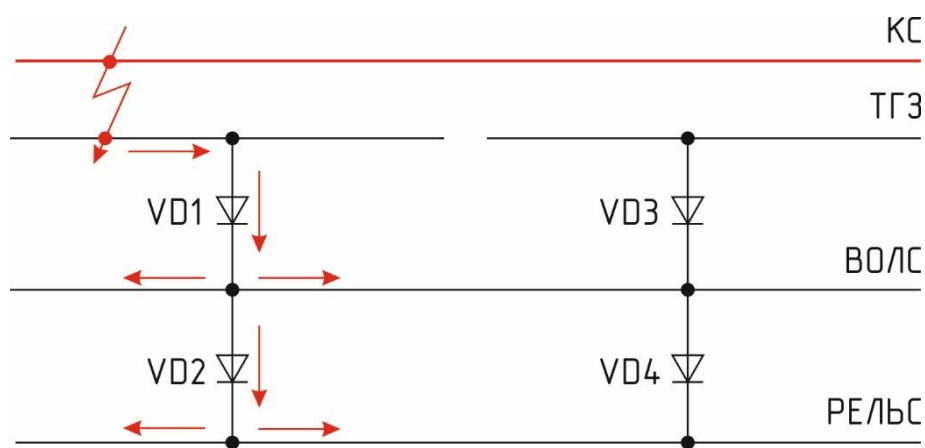


Рисунок 2.1 – Вариант № 1 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети

Из курса теоретической электротехники известно, что наличие либо отсутствие поперечных соединений у двух параллельно включённых сопротивлений не влияет на значение их эквивалентного сопротивления [56], поэтому режим работы $VD4$ и всех подобных ему диодов, включённых на данной межподстанционной зоне можно не учитывать, считая ВОЛС и рельсовую цепь включёнными параллельно. В выражении для расчёта сопротивления петли короткого замыкания в данном случае вместо сопротивления рельсового пути R_p необходимо подставить значение эквивалентного сопротивления:

$$R'_p = \frac{R_p \cdot R_{\text{ОКГТ}}}{R_p + R_{\text{ОКГТ}}}, \quad (2.1)$$

где R_p – сопротивление участка рельсовой цепи, от места возникновения КЗ (места присоединения заземляющего спуска к рельсу) до тяговой подстанции, Ом;

$R_{\text{ОКГТ}}$ – сопротивление участка волоконно-оптического кабеля, аналогичной длины, Ом.

Для различных типов тяговой сети и применяемого типа ОКГТ снижение сопротивления цепи обратного тока составит около 1,5 процентов, что малоэффективно. Недостатком рассматриваемого варианта также является наличие участка последовательного соединения на пути стекания тока короткого замыкания. При аварии в указанном на Рисунке 2.1 месте и обрыве вентиля $VD1$ группа опор окажется полностью отключённой от основного и дублирующего заземляющего проводника. Аналогичные проблемы возникнут при возникновении КЗ на правом по схеме участке заземления опор и обрыве диода $VD3$. При этом, при повреждении диодов $VD2$ или $VD4$, либо при повреждении места соединения заземляющего спуска с рельсом, ТГЗ сохранит соединение с заземлённым проводником – волоконно-оптическим кабелем. На Рисунке 2.2 показано токораспределение при обрыве $VD2$, полагая, что питающий центр – тяговая подстанция находится справа.

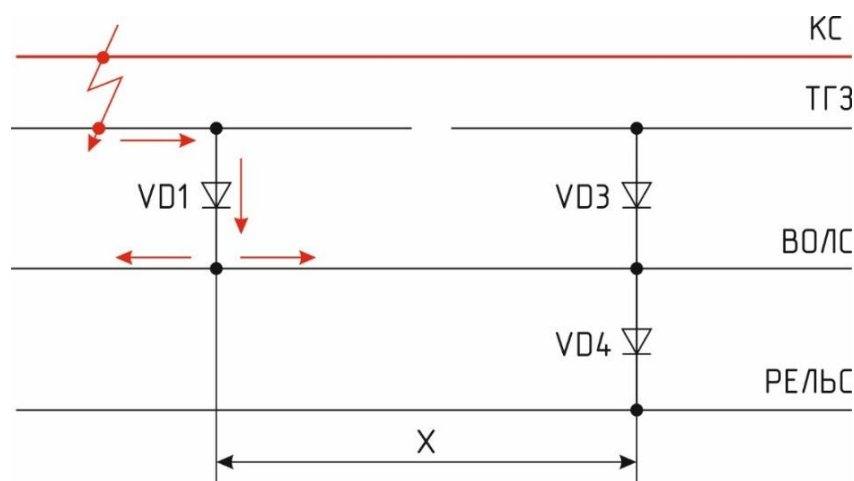


Рисунок 2.2 – Вариант № 1 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети, вынужденный режим

Увеличение сопротивления цепи обратного тока в таком случае определяется сопротивлением участка ВОЛС между двумя точками заземления на рельс. В рассматриваемом случае данная величина составит:

$$\Delta R = (\rho_{\text{ОКГТ}} - \rho_{\text{Р}}) \cdot X, \quad (2.2)$$

где $\rho_{\text{Р}}$ – удельное сопротивление рельсовой цепи, Ом/км;

$\rho_{\text{ОКГТ}}$ – удельное сопротивление волоконно-оптического кабеля, Ом/км.

Подводя итог, можно сделать вывод, что такое решение незначительно повлияет на сопротивление петли короткого замыкания, хотя позволит повысить надёжность системы группового заземления.

Развитием первого варианта является вариант № 2, в котором при включении ТГЗ исключается последовательная цепочка, снижающая надёжность схемного решения. Схемная реализация данного варианта представлена на Рисунке 2.3. Очевидно, что в штатном режиме, когда все соединения исправны, снижение сопротивления цепи обратного тока будет описываться выражением 2.1, а следовательно, эффект составит порядка 1,5 процентов снижения сопротивления цепи обратного тока.

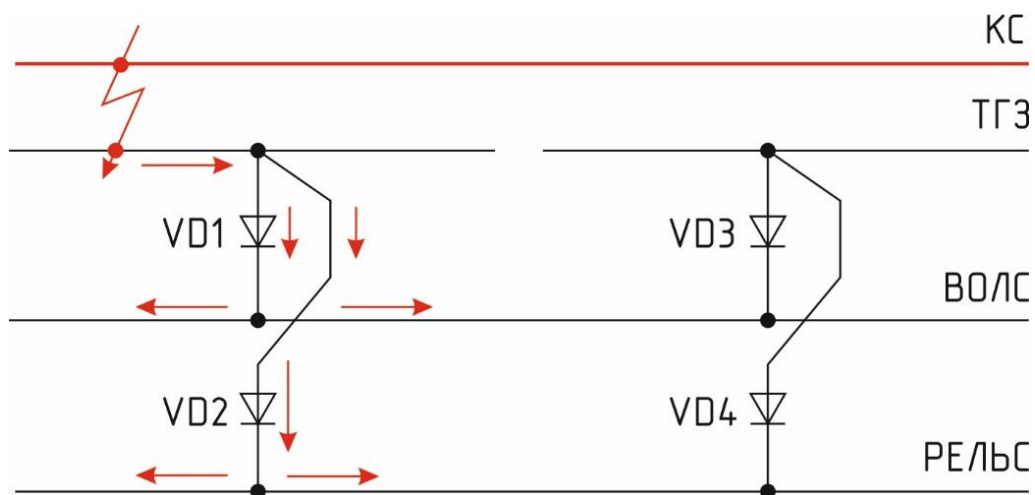


Рисунок 2.3 – Вариант № 2 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети

Анализ данного варианта в вынужденном режиме, когда основной проводник повреждён, например при обрыве диода $VD2$, стекание тока короткого замыкания будет происходить только на волоконно-оптический кабель. Токораспределение в вынужденном режиме для варианта № 2 приведено на Рисунке 2.4.

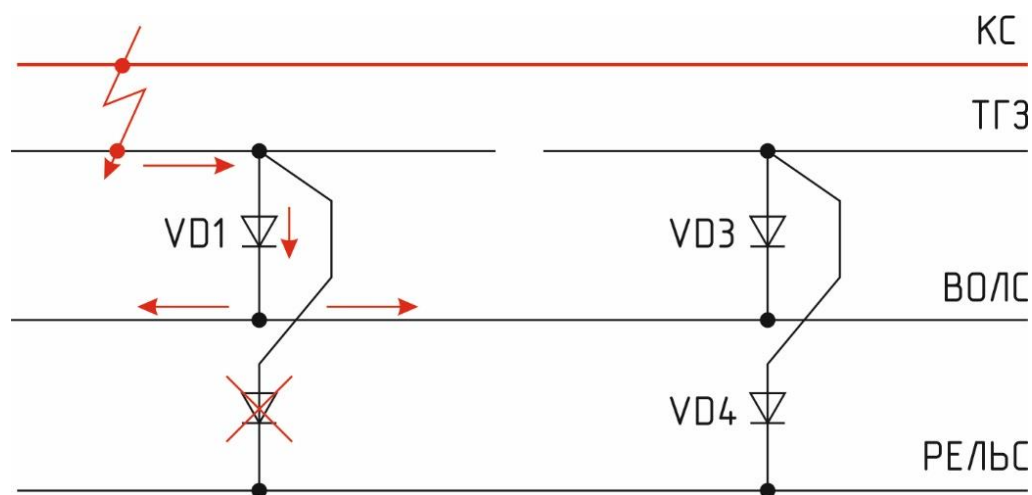


Рисунок 2.4 – Вариант №2 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети, вынужденный режим

Увеличение сопротивления петли обратного тока:

$$\Delta R = (\rho_{\text{ОКГТ}} - \rho_{\text{Р}}) \cdot L, \quad (2.3)$$

где L – расстояние от точки КЗ до тяговой подстанции.

Несмотря на сравнительно высокую надёжность данного схемного решения его эффективность мала, и применение такого решения не даст практического эффекта как в штатном, так и в вынужденном режимах.

Как было указано ранее, наиболее проблемными участками, с точки зрения распознавания факта короткого замыкания являются концы участка группового заземления опор, наиболее удалённые от тяговой подстанции. На Рисунке 2.5 схемное решение варианта № 3, на котором показан фрагмент межподстанционной зоны с односторонним питанием от тяговой подстанции, расположенной справа.

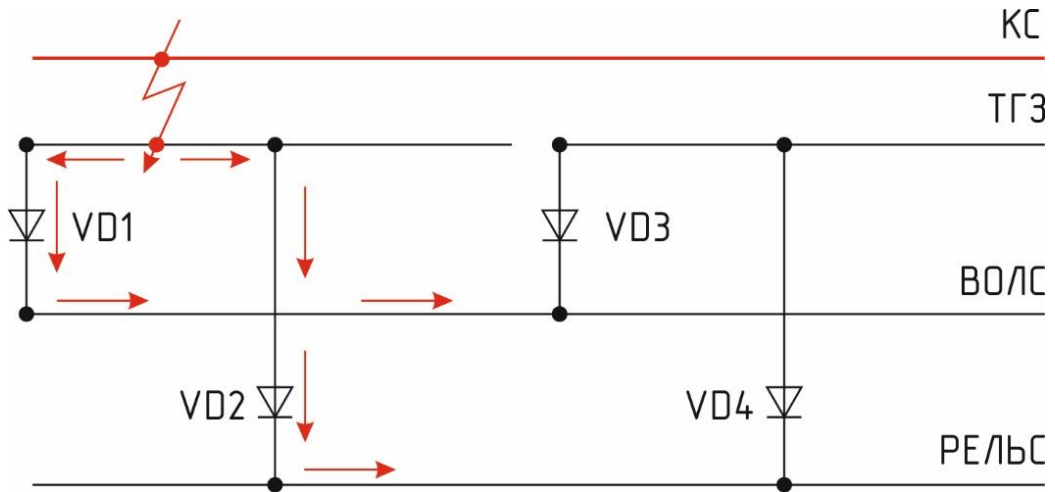


Рисунок 2.5 – Вариант № 3 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети

Дублирующее заземление выполнено для свободного конца ТГЗ, расположенного левее заземляющего спуска. Такое решение снизит сопротивление петли КЗ. Для случая одностороннего питания и расположения подстанции справа сопротивление цепи обратного тока будет определяться выражением:

$$R_{\text{КЗ}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{КС}} + \frac{R'_{\text{ОБР}} \cdot R''_{\text{ОБР}}}{R'_{\text{ОБР}} + R''_{\text{ОБР}}}, \quad (2.4)$$

где сопротивления обратной цепи тока КЗ $R'_{\text{ОБР}}$ и $R''_{\text{ОБР}}$ определяются как:

$$R'_{\text{ОБР}} = R'_{\text{ТГЗ}} + R_{\text{ОКГТ}}, \quad (2.5)$$

$$R''_{\text{ОБР}} = R''_{\text{ТГЗ}} + R_{\text{Р}}, \quad (2.6)$$

здесь $R'_{\text{ТГЗ}}$ – сопротивление участка ТГЗ от начала участка группового заземления опор до места КЗ;

$R''_{\text{ТГЗ}}$ – сопротивление участка ТГЗ от места КЗ до заземляющего спуска;

$R_{\text{ОКГТ}}$ – сопротивление ОКГТ от начала участка ТГЗ до тяговой подстанции.

При возникновении вынужденного режима, при обрыве $VD2$ либо $VD4$ токораспределение будет аналогично случаю, рассмотренному для предыдущего варианта.

Вариант № 4 является развитием варианта № 3, так как в нём предполагается наличие двух дополнительных соединений по концам существующего участка группового заземления опор (Рисунок 2.6).

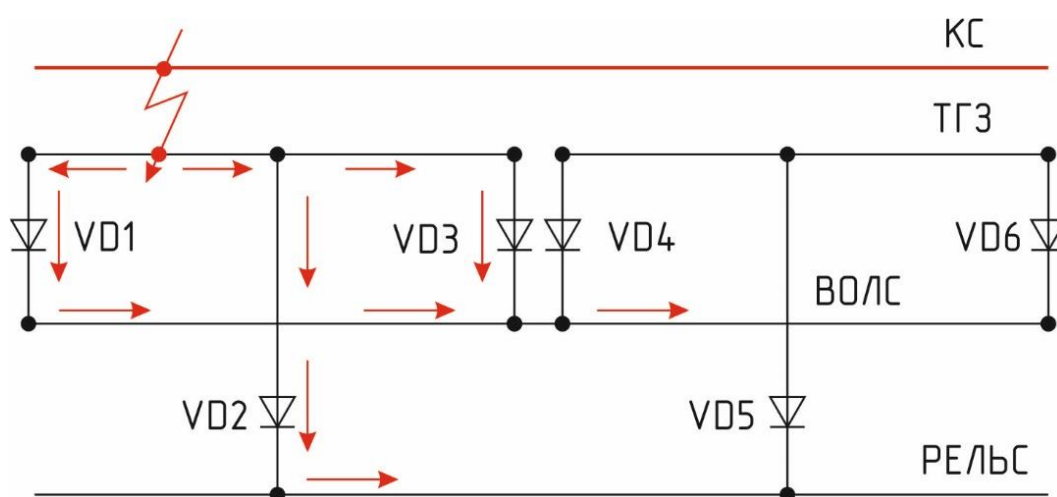


Рисунок 2.6 – Вариант № 4 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети

Здесь оба конца участка группового заземления опор соединены с ОКГТ при помощи диодов. Такой шаг позволит увеличить токи короткого замыкания по обоим концам защищаемого участка.

Исходя из ранее сделанного анализа очевидно, что при таком решении будет наблюдаться наибольший эффект по снижению сопротивления петли короткого замыкания. В вынужденном режиме при повреждении заземляющего спуска токораспределение будет иметь вид, показанный на Рисунке 2.7. Для дополнительного уменьшения сопротивления петли короткого замыкания необходимо в пределах межподстанционной зоны обеспечить организацию дополнительных соединений троса ОКГТ с рельсовой цепью.

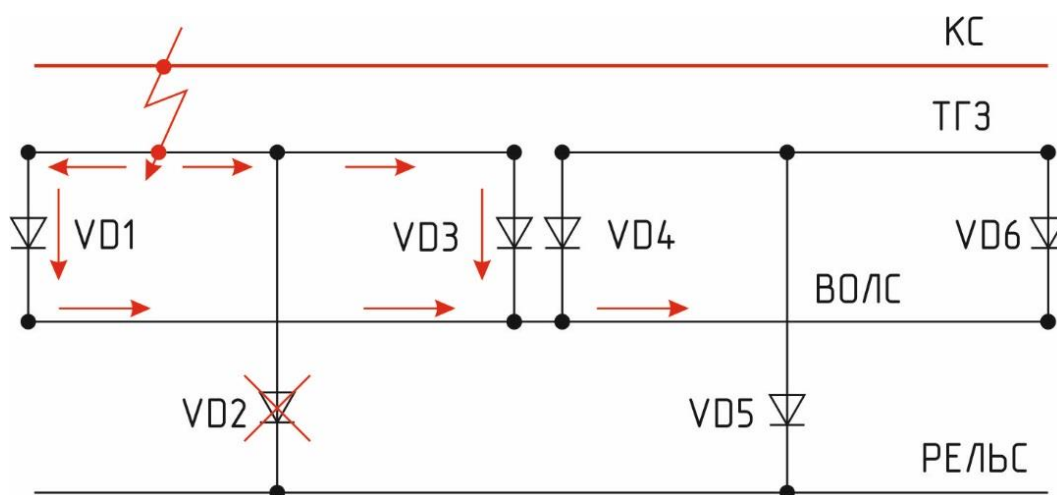


Рисунок 2.7 – Вариант № 4 организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети, вынужденный режим

Данный вариант является оптимальным с точки зрения снижения сопротивления петли короткого замыкания и будет использован в качестве основного при разработке двухуровневой системы группового заземления опор контактной сети.

2.3 Электрические режимы системы с дополнительным заземлением опор на металлическую оболочку ВОЛС

Разрабатываемая в работе система заземления опор контактной сети в нормальном режиме, когда отсутствует точка короткого замыкания, находится в состоянии, при котором токи во всех ветвях данной цепи отсутствуют. Рабочим режимом для рассматриваемой системы является аварийный режим в тяговой сети, когда возникает короткое замыкание. Факторами, влияющими на величину тока короткого замыкания, являются: схема питания контактной сети, схема заземления металлической оболочки волоконно-оптической линии связи на рельс в пределах межподстанционной зоны, а также наличие повреждений в системе группового заземления опор контактной сети.

Как указывалось выше, режим работы разрабатываемой системы заземления опор зависит от способа заземления металлической оболочки волоконно-оптического кабеля. Волоконно-оптический кабель типа ОКГТ обладает электрическим сопротивлением, значительно превосходящим по своему значению сопротивление двух ниток рельсовой цепи. Этот факт вносит существенное влияние на формирование итогового значения сопротивления петли короткого замыкания.

Наличие дополнительных точек заземлений ОКГТ вдоль межподстанционной зоны позволяет снизить величину сопротивления цепи обратного тока. Максимально это влияние будет выражено для точек, расположенных ближе к концам участка группового заземления опор. Однако, выбирая число и место наложения дополнительных заземлителей ОКГТ следует руководствоваться требованиями к надёжной работе систем автоблокировки и соображениями технико-экономической целесообразности таких мер.

Отдельно остановимся на электрических режимах работы разрабатываемой системы в вынужденном режиме, когда произошло повреждение одного из элементов системы группового заземления опор. Здесь следует выделить следующие возможные варианты повреждений: обрыв заземляющего спуска ТГЗ, обрыв троса группового заземления, обрыв дублирующего заземляющего шлейфа на ОКГТ, обрыв ОКГТ. Говоря об обрывах шлейфа либо заземляющего спуска, будем полагать в этом виде повреждения и обрыв соответствующего диода, так как неважно, из-за чего произошёл разрыв электрической ветви в схеме. Рассмотрим перечисленные режимы подробнее.

Рассмотрим случай нарушения пути тока через заземляющий спуск, при повреждении последнего, Рисунок 2.8. При таком виде отказа связь группы опор с рельсовой цепью сохраняется, но осуществляется через участок волоконно-оптической линии связи. По мере удаления места короткого замыкания от точки соединения ВОЛС и рельсовой цепи, величина сопротивления ВОЛС будет возрастать, что очевидно приведёт к увеличению сопротивления петли короткого замыкания. Электрическая связь опор с рельсовой цепью сохранится.

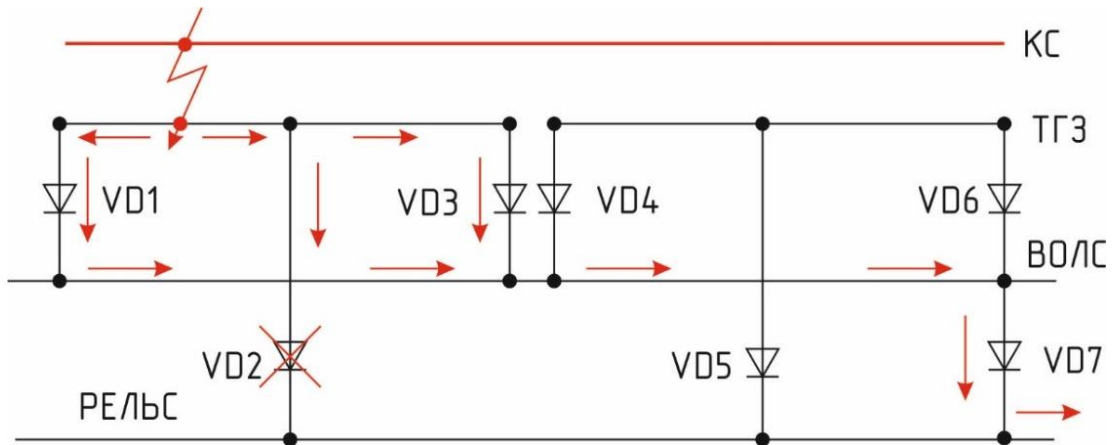


Рисунок 2.8 – Работа двухуровневой системы заземления опор контактной сети в вынужденном режиме при обрыве заземляющего спуска

При нарушении целостности троса группового заземления (Рисунок 2.9), возможны два варианта: в первом случае, при коротком замыкании в точке 1, обрыв произошёл между точкой КЗ и заземляющим спуском. При таком варианте ток будет стекать по тросу ОКГТ, на рисунке данный вариант показан стрелками красного цвета. Если авария произойдёт в точке 2, то протекание тока КЗ будет происходить по существующему заземляющему спуску и, частично по оставшемуся в работе дополнительному заземляющему проводнику, соединяющему ТГЗ и ОКГТ.

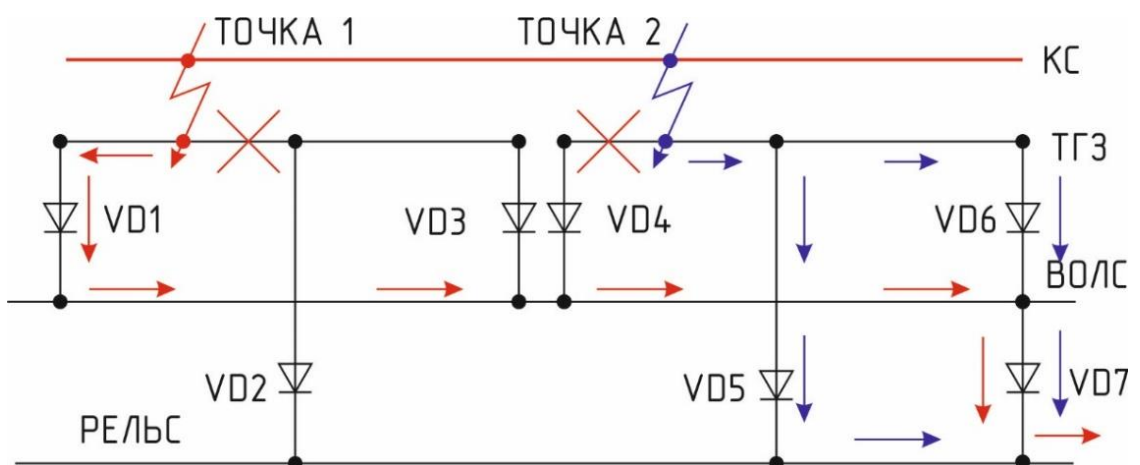


Рисунок 2.9 – Работа двухуровневой системы заземления опор контактной сети в вынужденном режиме при обрыве троса группового заземления

При нарушении целостности одного из двух дополнительных проводников, соединяющих ТГЗ и ОКГТ токораспределение в схеме при аварии будет аналогичным случаю, рассмотренному выше, при КЗ в точке 2. При отказе обоих дополнительных соединительных проводников двухуровневая схема заземления превратится в одноуровневую, традиционную, точка 1 (Рисунок 2.10).

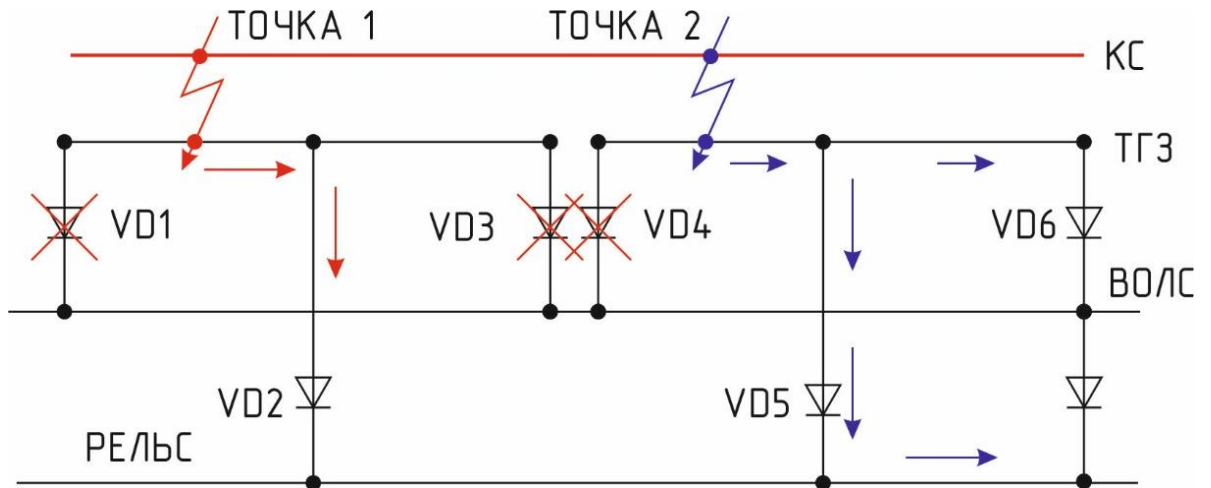


Рисунок 2.10 – Работа двухуровневой системы заземления опор контактной сети в вынужденном режиме при обрыве дополнительных соединителей

Рассмотрим случай нарушения целостности волоконно-оптического кабеля (Рисунок 2.11).

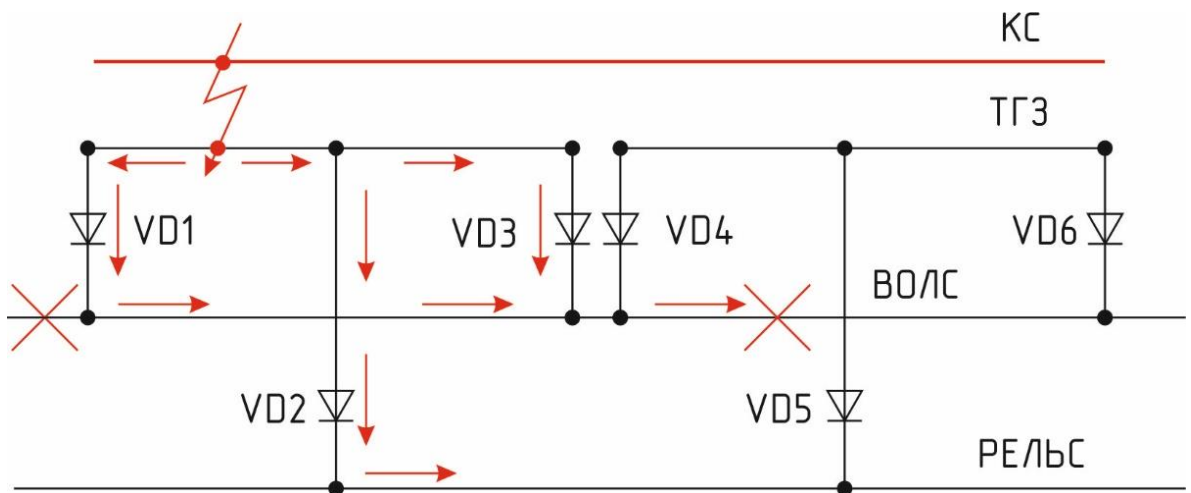


Рисунок 2.11 – Работа двухуровневой системы заземления опор контактной сети в вынужденном режиме при обрыве ВОЛС

При обрыве кабеля в точке 1, находящейся левее участка ГЗ, где находится точка короткого замыкания, и при условии, что при одностороннем питании подстанция располагается справа, никакого изменения в токораспределении наблюдаться не будет. Если обрыв произойдёт правее указанного участка, то схема, очевидно превратится в традиционную одноуровневую схему заземления. Прочие случаи обрывов ВОЛС могут быть сведены к рассмотренным выше вариантам.

Рассмотренные режимы работы предлагаемой системы группового заземления опор могут быть использованы при анализе её работы.

2.4 Электрические схемы замещения и расчётные режимы

Анализ работы системы с дополнительным заземлением опор контактной сети при использовании металлической оболочки волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ необходимо производить руководствуясь двумя основополагающими задачами. Первая, и основная задача, как было сказано ранее – это увеличение минимальных токов КЗ на наиболее проблемных участках. При использовании традиционной схемы заземления опор точка, в которой величина токов КЗ будет минимальна расположена на конце участка группового заземления опор, наиболее удалённого от питающего центра. Расчёт тока в этой точке однозначно определяет минимальный ток КЗ. В случае использования схем двустороннего питания точку минимума тока КЗ также несложно выявить в середине межподстанционной зоны.

Иначе обстоит дело при использовании схем двухуровневого заземления. В аварийных режимах, благодаря наличию дополнительных путей протекания токов КЗ по концам участков группового заземления опор, точки минимумов для токов короткого замыкания несколько сместятся с концов участка группового заземления к его середине. Также следует учитывать, что ВОЛС может иметь точки повторного заземления на рельсовую цепь, и в зависимости от расположения этих точек будет варьироваться местоположение участка с минимальным током короткого

замыкания. Таким образом, при использовании схемы двухуровневого заземления опор контактной сети целесообразно для нахождения минимальных значений тока КЗ выполнять расчёт в пределах всего участка, особенно при условии, что на участке используются различные типы контактной подвески либо троса группового заземления.

Таким образом возникает вторая задача – определение максимально возможных значений токов короткого замыкания в кабеле. Важно отметить, что в волоконно-оптический кабель в рабочем режиме будет ответвляться часть полного тока КЗ, а в вынужденном режиме, при повреждении основной цепи обратного тока величина тока КЗ будет ниже, но он полностью будет протекать по ВОЛС.

Для решения поставленной задачи составим электрическую схему замещения проектируемой системы двухуровневого заземления опор контактной сети, рассматривая все протяженные проводники как однородные линии с распределёнными параметрами (ЛРП). Как известно, из курса ТОЭ, любая ЛРП обладает четырьмя независимыми первичными параметрами – распределённым активным сопротивлением, распределённой индуктивностью, распределённой ёмкостью и распределённой проводимостью утечки изоляции [56]. Схема замещения представлена на Рисунке 2.12.

В схеме приняты следующие обозначения. Элементы, относящиеся к контактной сети, рельсовому пути, оптоволоконной линии связи и тросу группового заземления обозначены соответствующими индексами «К», «Р», «О», «Т» соответственно. Участок от начала трассы ТГЗ до места короткого замыкания имеет индекс «1» для всех перечисленных выше линий. Участок от точки КЗ до места соединения ТГЗ с заземляющим спуском имеет индекс «2», участок от заземляющего спуска до конца трассы ТГЗ обозначен индексом «3». Индексами «4» и «6» обозначены участки от места соединения ТГЗ с ОКГТ до точки соединения ОКГТ с рельсовой цепью, а индексами «5» и «7» – от места соединения ОКГТ с рельсом до тяговой подстанции. Все активные сопротивления, индуктивности и ёмкости схемы замещения следует определять как произведение первичных параметров соответствующей линии на длину конкретного участка.

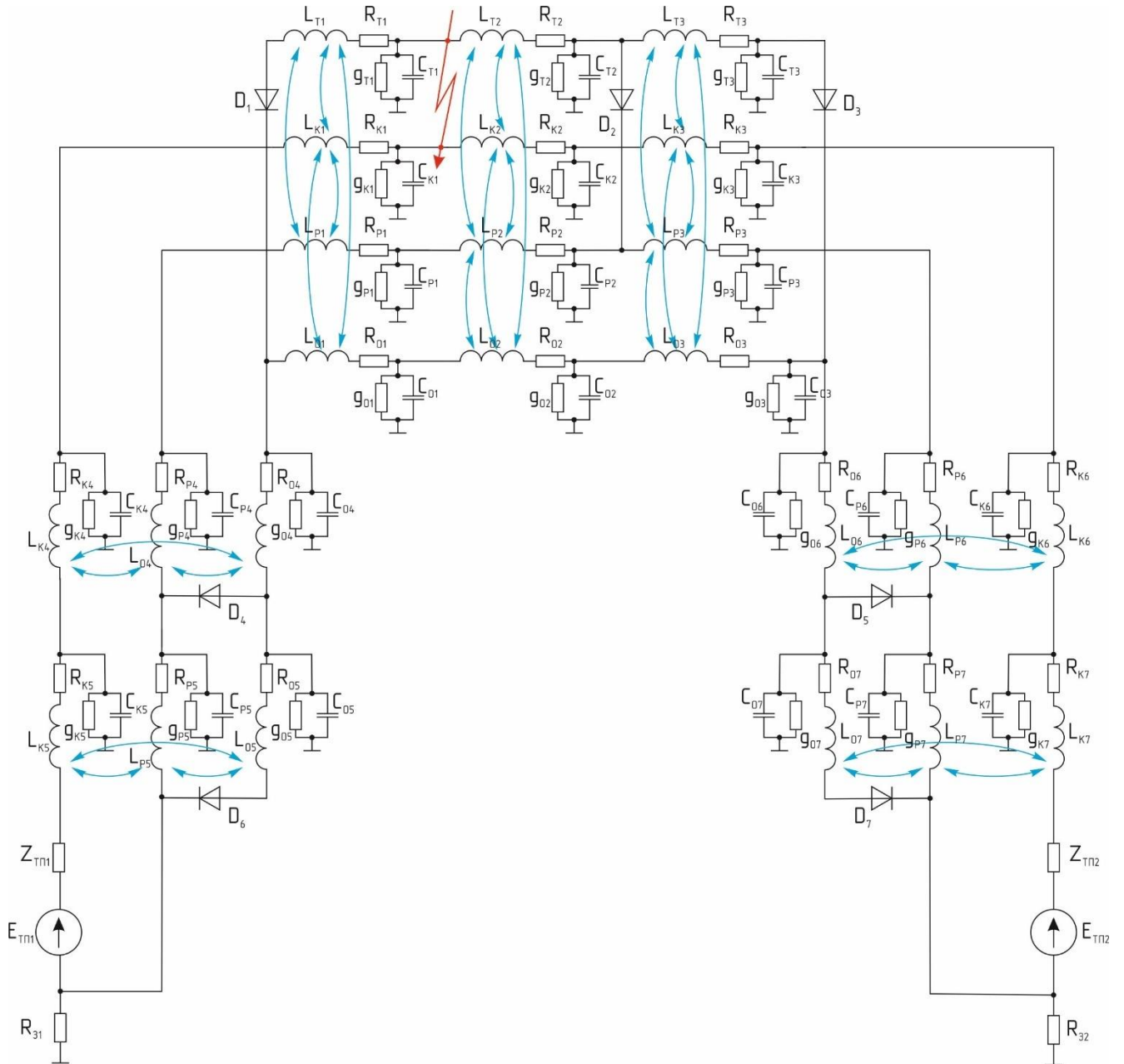


Рисунок 2.12 – Электрическая схема замещения для расчётов тока короткого замыкания в контактной сети при двухуровневой схеме заземления опор

$$R_{XN} = r_X \cdot l_N,$$

$$L_{XN} = L_X \cdot l_N, \quad (2.7)$$

$$C_{XN} = C_X \cdot l_N,$$

$$g_{XN} = g_X \cdot l_N,$$

где r_x – удельное активное сопротивление линии, Ом/км;
 L_x – удельная индуктивность линии, Гн/км;
 C_x – удельная ёмкость линии, Ф/км;
 g_x – удельная проводимость линии, См/км;
 l_N – длина участка линии, км.

Также в схеме учтено комплексное сопротивление тяговой подстанции – $Z_{ТП}$, включающее сопротивление внешней энергосистемы и всех звеньев тяговой подстанции, участвующих в процессе преобразования энергии. Сопротивления заземления двух смежных тяговых подстанций обозначены на схеме замещения элементов R_3 . Диод D_2 включён в цепь существующего заземляющего спуска, D_1 и D_3 используются для соединения концов участка ТГЗ с ОКГТ, D_4 и D_5 служат для заземления участка ОКГТ на рельсы, D_6 и D_7 предназначены для соединения ОКГТ с контуром заземления тяговых подстанций. Также на схеме замещения учитываются взаимоиндуктивные связи между параллельно следующими линиями.

Предложенная схема может быть использована для исследования токов короткого замыкания в переходном режиме. Для расчётов токов КЗ в установившемся режиме необходимости в учёте реактивных элементов схемы нет, так как рассматриваемая система является системой постоянного тока. В связи с вышеизложенным, для дальнейших рассуждений полную схему можно существенно упростить, исключив взаимоиндуктивные связи, заменив конденсаторы разрывом цепи, индуктивности – проводниками с нулевым сопротивлением.

2.5 Влияния гололёдных образований и меры по их устранению

Введение дополнительного проводника в систему электроснабжения участка железной дороги постоянного тока влечёт за собой потребность в решении задачи,

направленной на борьбу с гололёдообразованием на этом проводнике [59]. Гололёд, образовавшийся на проводах и грозозащитных тросах, оказывает дополнительную механическую нагрузку на провод, тросы и опоры, что создаёт риск для работы всего участка железной дороги. Под действием гололёдно-ветровых нагрузок тросы могут недопустимо приближаться к питающим проводам, что сопровождается неустойчивыми короткими замыканиями (КЗ), или происходит их обрыв и создание устойчивых КЗ. С другой стороны, учитывая специфику крепления троса ОКГТ к опоре при высоких гололёдных нагрузках не исключена вероятность возникновения критического изгибающего момента, ведущего к повреждениям кронштейна крепления ОКГТ, а как следствие вероятности возникновения устойчивого КЗ на линии, проходящей с полевой стороны. И то и другое в случае применения в качестве ВОЛС кабеля ОКГТ ведёт к перегреву оптических волокон (ОВ), нарушению его характеристик и к его разрушению, либо обрыву. В районах с вероятностью отложения гололёда для увеличения надёжности работы участка железной дороги необходимо обеспечить удаление гололёда с проводов и троса ОКГТ.

Как следует из представленных выше рассуждений, волоконно-оптический проводник типа ОКГТ присоединяется к рельсовой цепи через диодные вентили, для исключения возможности стекания тока с рельсов обратно в ОКГТ. Также, как было отмечено ранее, соединение концевых участков троса группового заземления опор осуществляется при помощи диодных вентилях. Указанные особенности схемной реализации системы двухуровневого заземления опор контактной сети позволяют организовать плавку гололёда на волоконно-оптическом кабеле, не приводящую к возможности возникновения опасных напряжений на несущих и поддерживающих конструкциях опор контактной сети.

При организации плавки гололёда будем использовать принципы, применяемые на электрифицированных дорогах постоянного тока, которые используются при плавке гололёда на контактной сети [60]. В зависимости от конкретных условий применяется несколько возможных вариантов. Для однопутных участков чаще всего используют консольные схемы плавки гололёда,

для двухпутных участков чаще применяются петлевые схемы либо до соседней подстанции, либо до поста секционирования.

Для практического применения указанных решений на тяговых подстанциях, питающих межподстанционную зону, на которой планируется плавка гололёда, дополнительно монтируют разъединители плавки гололёда. Данные коммутационные аппараты используют для соединения запасной и минусовой шин тяговой подстанции.

Особенностью организации плавки гололёда на кабеле ОКГТ является то, что кабель имеет связь с контуром заземления смежных подстанций, то есть подключён своими концами к минусовым шинам подстанций. Для решения задачи организации плавки гололёда необходимо предусмотреть возможность отключать один из концов кабеля от контура заземления. На Рисунке 3.2 соединение ОКГТ с минусовыми шинами подстанций показано вентилями VD_A и VD_B .

Как следует из представленной схемы замещения, ОКГТ соединяется на всём пути следования с рельсовой цепью, однако это соединение осуществляется с использованием диодных вентиляй, для исключения возможности стекания тока с рельсов обратно в ОКГТ. Также следует учесть, что соединение ОКГТ с существующими в настоящее время участками ТГЗ выполнено также с применением диодов. Таким образом, приложенный к ОКГТ положительный потенциал приведёт к запираению всех диодов, соединяющих ОКГТ с ТГЗ и вынос потенциала на ТГЗ в процессе плавки будет исключён. При условии, что кабель ОКГТ соединяется с минусовыми шинами только по краям участка можно предложить два возможных варианта организации плавки на ОКГТ.

Рассмотрим вариант организации плавки по схеме подстанция – подстанция с протеканием тока по ОКГТ и рельсовой цепи (Рисунок 2.13). При реализации данного способа плавки гололёда вентили VD_A и VD_B выведены из работы. При этом VD_A отключён при помощи разъединителя, а VD_B зашунтирован с целью защиты от пробоя. Таким образом ОКГТ отключается от контура заземления тяговой подстанции «А» и подключается к шине питающего фидера контактной сети данной подстанции при помощи разъединителя.

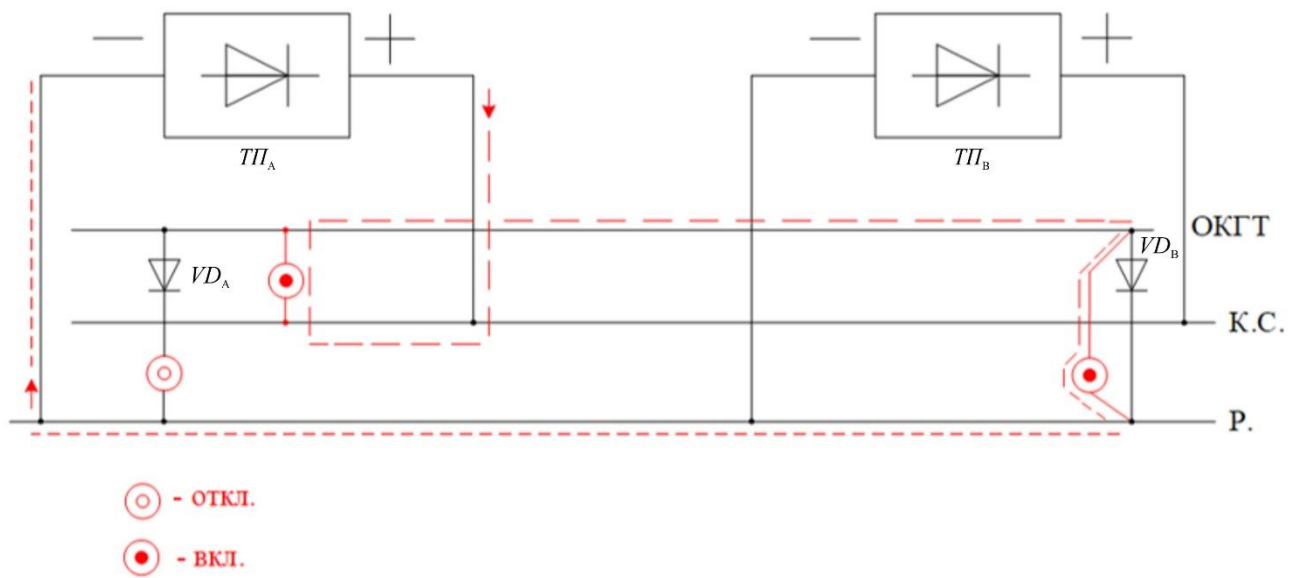


Рисунок 2.13 – Плавка гололёда от подстанции до подстанции с прохождением тока по пути ОКГТ – рельсовая цепь

Напряжение с фидера контактной сети через разъединитель подаётся на конец кабеля ОКГТ. Рельс в такой схеме выступает в качестве добавочного сопротивления. Сопротивление петли протекания тока плавки гололёда в данном случае, можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{петли}} = R_{\text{ТП}} + (\rho_{\text{ОКГТ}} + \rho_{\text{рельс}}) \cdot \ell, \quad (2.8)$$

где $\rho_{\text{ОКГТ}}$ – удельное сопротивление ОКГТ, Ом/км;

$\rho_{\text{рельс}}$ – удельное сопротивление рельсового пути, Ом/км;

ℓ – длина участка, км;

$R_{\text{ТП}}$ – сопротивление тяговой подстанции, Ом, согласно [9] вычисляется по следующему выражению:

$$R_{\text{ТП}} = K_R \cdot \left(\frac{1}{S_{\text{КЗ}}} + \frac{0,01 \cdot u_{\text{к ПТ}}}{n_{\text{ПТ}} \cdot S_{\text{ПТ ном}}} + \frac{0,01 \cdot u_{\text{к К}}}{n_{\text{ТТ}} \cdot S_{\text{ТТ ном}}} \right), \quad (2.9)$$

где $S_{КЗ}$ – мощность трёхфазного замыкания на вводе тяговой подстанции, МВ·А;

K_R – коэффициент, зависящий от схемы преобразования, $K_R = 7,41$ при трехфазной мостовой схеме, $K_R = 3,67$ при эквивалентной двенадцатифазной мостовой схеме;

$u_{к\text{пт}}$ – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, %;

$S_{\text{пт ном}}$, $S_{\text{тт ном}}$ – номинальная мощность понижающего и преобразовательного трансформатора, МВ·А;

$n_{\text{пт}}$, $n_{\text{тт}}$ – количество параллельно работающих трансформаторов;

$u_{кк}$ – напряжение короткого замыкания коммутации преобразовательного трансформатора по [60], приведённого к мощности $S_{\text{тт ном}}$, %.

Полученное значение сопротивления необходимо использовать для определения тока плавки, который будет протекать по ОКГТ:

$$I_{\text{плавки}} = \frac{U_{\text{ТП}}}{R_{\text{петли}}}, \quad (2.10)$$

где $U_{\text{ТП}}$ – напряжение на шинах тяговой подстанции, МВ·А.

Полученную величину тока следует сравнить с допустимым значением тока, длительно протекающего по ОКГТ. Представленная схема имеет наибольшее значение тока плавки, так как использует в качестве провода обратного тока рельсовую цепь – проводник с наименьшим удельным сопротивлением. В случае, если ток для плавки гололёда будет недостаточным, но его значение будет меньше допустимого для кабеля ОКГТ можно прибегнуть к варианту плавки, когда контур протекания тока образован между тяговой подстанцией и постом секционирования.

Двусторонняя схема плавки гололёда от подстанции до поста секционирования с прохождением тока по пути ОКГТ – рельс (Рисунок 2.14).

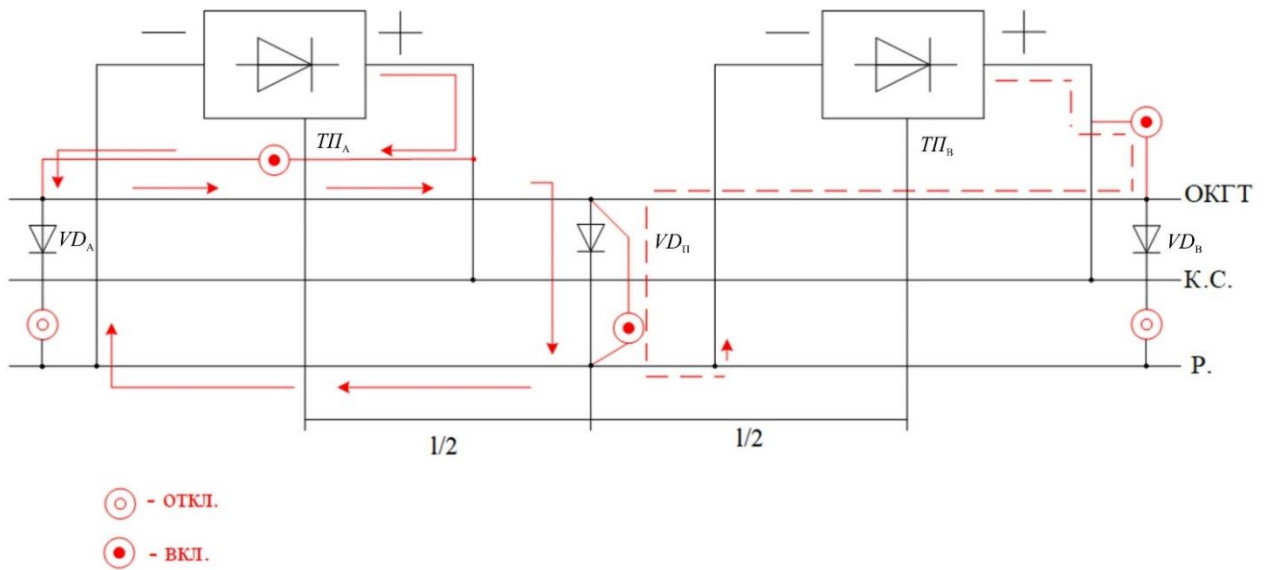


Рисунок 2.14 – Плавка гололёда от подстанции до поста секционирования с прохождением тока по пути ОКГТ – рельсовая цепь

Сокращение длины участка ОКГТ позволит снизить сопротивление петли протекания тока и повысить его значение, однако в таком случае плавка гололёда будет осуществляться сразу с двух тяговых подстанций одновременно.

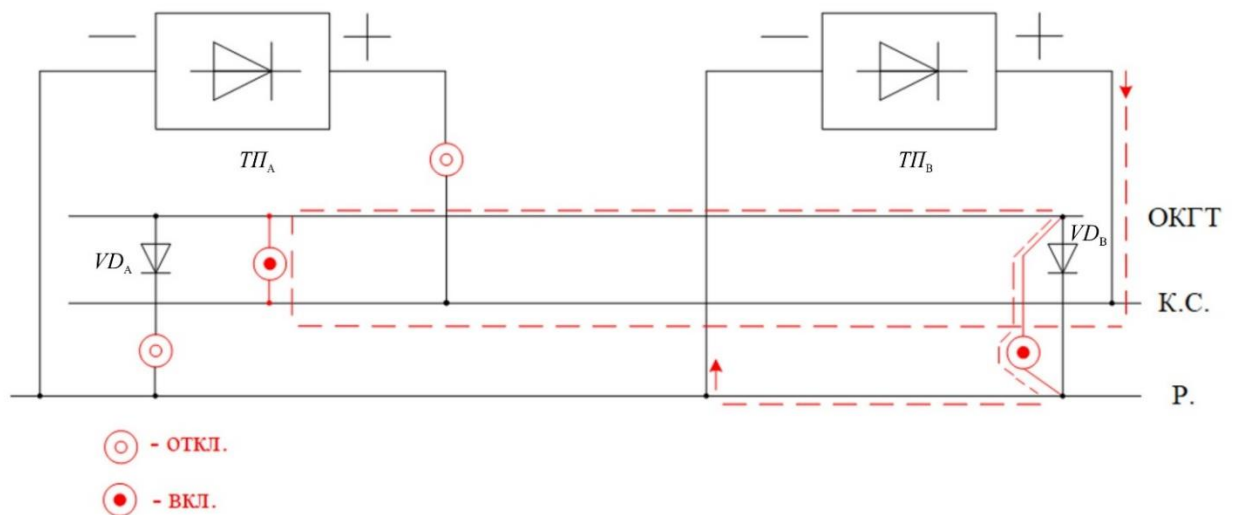


Рисунок 2.15 – Плавка гололёда от подстанции до подстанции с прохождением тока по пути ОКГТ – контактная сеть

Если при анализе полученного значения тока плавки, определённого по выражению 2.8 будет установлено, что величина тока избыточна, следует на

первом этапе рассмотреть схему, изображенную на Рисунке 2.15. Здесь, в отличие от схемы на Рисунке 2.14 в качестве проводника обратного тока использована контактная сеть. Сопротивление контактной сети больше сопротивления рельсовой цепи в 3–4 раза, в зависимости от применяемых типов проводов. Такой шаг позволит несколько снизить величину тока плавки гололеда. Как и в варианте, показанном на Рисунках 2.13 и 2.14 ОКГТ отключён от контура заземления и подключён к шине питающего фидера, но в качестве добавочного сопротивления выступает не рельс, а контактная сеть. Сопротивление петли рассчитываем по формуле:

$$R_{\text{петли}} = R_{\text{ТП}} + (\rho_{\text{ОКГТ}} + \rho_{\text{КС}}) \cdot l, \quad (2.11)$$

где $\rho_{\text{КС}}$ – удельное сопротивление контактной сети, Ом/км.

Дальнейшее регулирование значения тока плавки также можно осуществить путём изменения количества параллельно работающих трансформаторов.

2.6 Оценка повышения надёжности группового заземления опор с применением металлической оболочки ВОЛС

Для оценки надёжности предлагаемой системы дополнительного заземления опор контактной сети постоянного тока будут использованы получившие широкое распространение методы расчёта [64], такие как метод преобразования схем при смешанном соединении. Несмотря на то, что система группового заземления является восстанавливаемой, и состоит из отдельных невосстанавливаемых элементов, время наработки между отказами всей системы значительно больше, чем время ее восстановления. В связи с этим прием время восстановления равным нулю и будем проводить расчет показателей надёжности, как для невосстанавливаемой системы.

2.6.1 Расчёт показателей надёжности предлагаемой системы двухуровневого заземления опор контактной сети

Рассмотрим схему организации заземления опор с позиции определения надёжности работы. Выделим отдельный узел, состоящий из группы опор, заземлённых на ТГЗ, самого ТГЗ, дублирующего проводника – металлической оболочки ОКГТ, а также проводников, устройств и зажимов соединяющих ТГЗ с ОКГТ. Рассматриваемый узел показан на Рисунке 2.16.

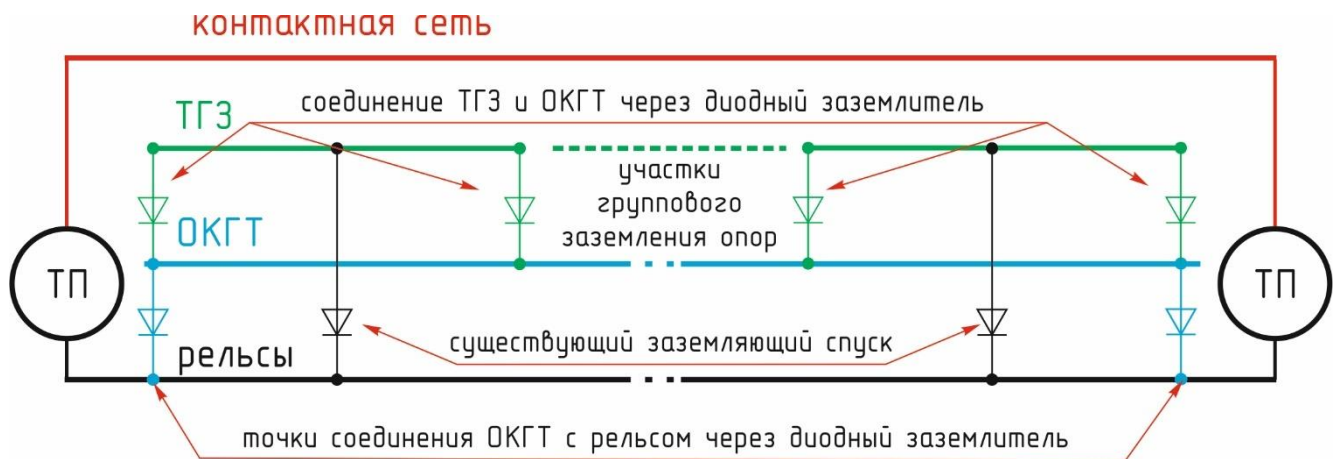


Рисунок 2.16 – Участок организации двухуровневого заземления опор контактной сети на участке постоянного тока

Как указывалось ранее, трос группового заземления кроме основного заземляющего спуска на рельс снабжается двумя дополнительными шлейфами, соединяемыми с ОКГТ. Особенность этих шлейфов заключается в том, что соединение осуществляется на высоте подвеса этих проводников, а следовательно, они имеют повышенную вандалостойкость, в том числе и при проведении работ на полотне железной дороги.

Выделим из множества участков группового заземления опор, показанных на Рисунке 2.16 единственный, и представим рассматриваемый участок эквивалентной схемой замещения для расчёта показателей надёжности методом преобразования схем при смешанном соединении (Рисунок 2.17).

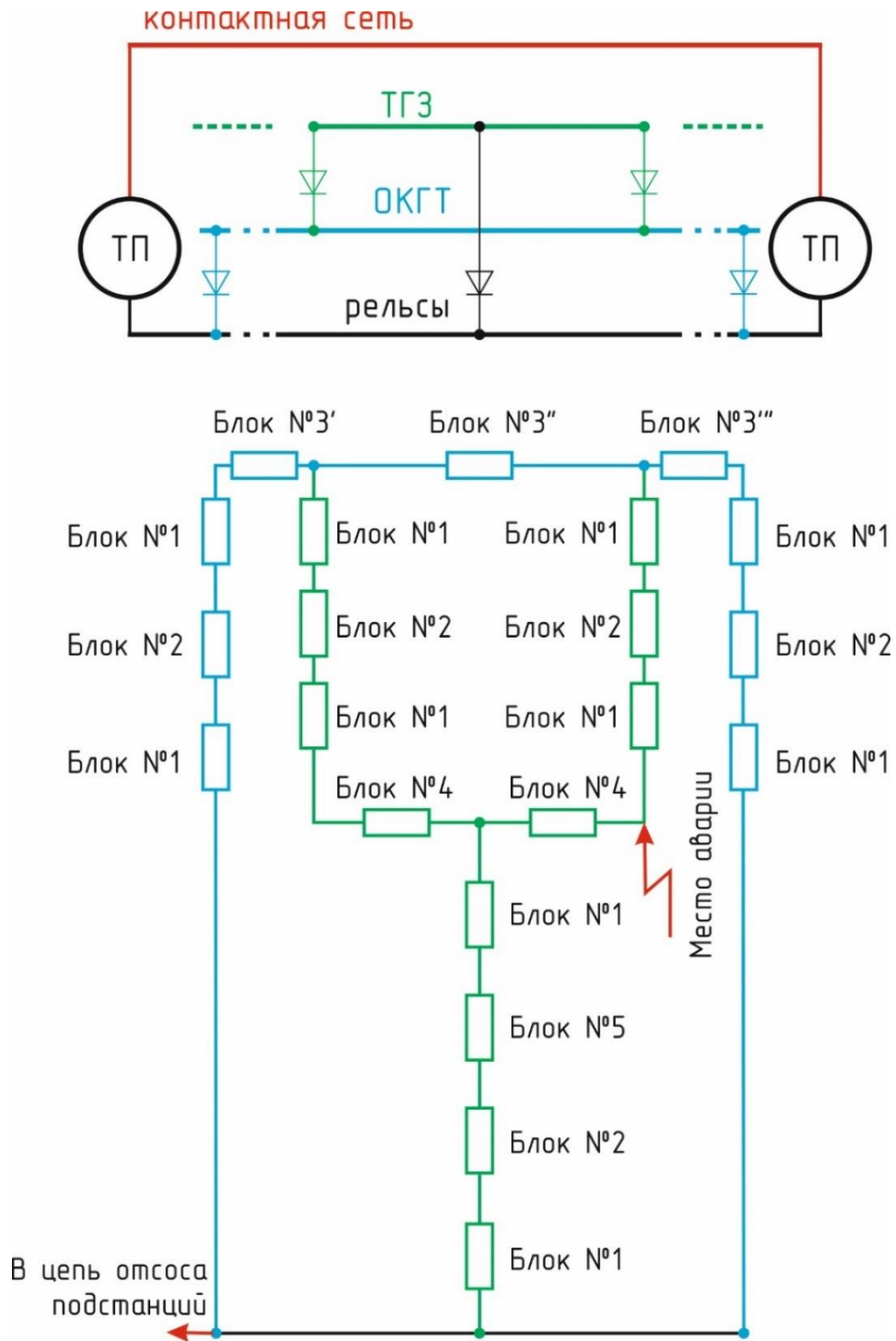


Рисунок 2.17 – Схема замещения участка двухуровневого заземления

На Рисунке 2.17 приняты следующие условные обозначения:

- блок №1 – Зажим соединительный (в зависимости от типа крепления);
- блок №2 – Диод, используемый для заземления опор;
- блок №3 – ОКГТ по участкам – 3', 3'', 3''';
- блок №4 – ТГЗ, левее и правее существующего заземляющего спуска;

– блок №5 – Сдвоенный стальной проводник заземляющего спуска.

Обозначив переменной F вероятность безотказной работы каждого блока рассчитаем, используя известные из теории надёжности [64] соотношения, вероятность безотказной работы участков, образованных последовательно соединёнными элементами:

$$F_A = F_1 \cdot F_2 \cdot F_{3'} \cdot F_1,$$

$$F_B = F_1 \cdot F_2 \cdot F_{3''} \cdot F_1,$$

$$F_C = F_1 \cdot F_2 \cdot F_1 \cdot F_4,$$

$$F_D = F_1 \cdot F_2 \cdot F_1,$$

$$F_E = F_1 \cdot F_2 \cdot F_5 \cdot F_1.$$

После выполненных преобразований получим схему замещения с учётом сделанных изменений, Рисунок 2.18.

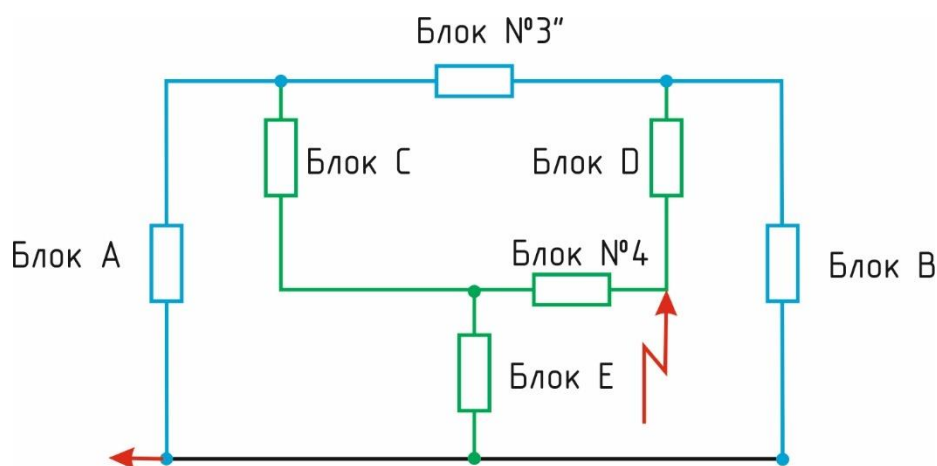


Рисунок 2.18 – Упрощённая схема замещения участка

Обозначив переменной Q вероятность отказа блока преобразуем звезду «С–Е–4» в треугольник «а–b–с», звезду «В–D–3''» в треугольник «d–e–f» (Рисунок 2.19).

$$Q_a = \sqrt{\frac{Q_c \cdot Q_E}{Q_4}}, \quad Q_b = \sqrt{\frac{Q_C \cdot Q_4}{Q_E}}, \quad Q_c = \sqrt{\frac{Q_E \cdot Q_4}{Q_C}}.$$

$$Q_d = \sqrt{\frac{Q_D \cdot Q_{3''}}{Q_B}}, \quad Q_e = \sqrt{\frac{Q_{3''} \cdot Q_B}{Q_D}}, \quad Q_f = \sqrt{\frac{Q_D \cdot Q_B}{Q_{3''}}}.$$

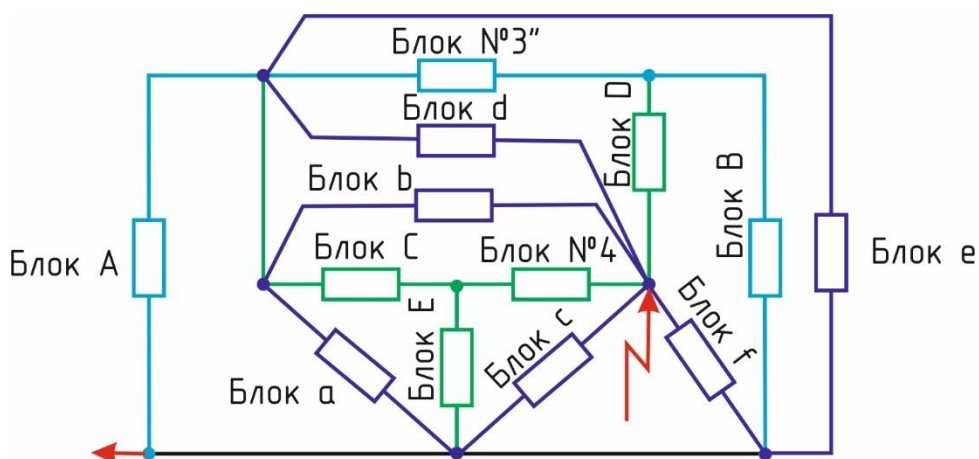


Рисунок 2.19 – Преобразование схемы замещения

Блоки «А», «а» и «е» соединены параллельно, заменим их эквивалентным блоком «G», блоки «b» и «d» заменим блоком «H», блоки «f» и «c» заменим блоком «J»:

$$F_G = 1 - Q_A \cdot Q_a \cdot Q_e,$$

$$F_H = 1 - Q_b \cdot Q_d,$$

$$F_J = 1 - Q_f \cdot Q_c.$$

После выполненных преобразований имеем схему, Рисунок 2.20.

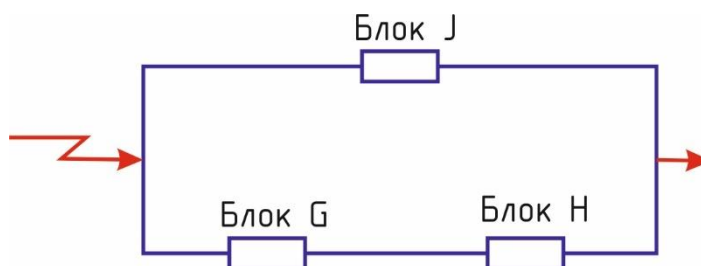


Рисунок 2.20 – Схема замещения в процессе преобразования

Блоки «G» и «H» соединены последовательно, заменим их эквивалентным блоком «K». Блоки «K» и «J» соединены параллельно, заменим их эквивалентным блоком, который будет являться результатом эквивалентирования системы.

$$F_K = F_G \cdot F_H.$$

$$F = 1 - (1 - F_K) \cdot (1 - F_J).$$

Используя представленный алгоритм, выполним расчёт показателей надёжности предлагаемой системы группового заземления опор. В качестве расчётного периода выберем диапазон в 1 год. Зададимся следующими статистическими данными, из расчёта на 100 км длины [64], которые будут использованы в качестве исходных в процессе расчёта. В Таблице 2.1 представлены показатели надёжности элементов, входящих в предлагаемую систему группового заземления.

Таблица 2.1– Показатели надёжности различных элементов

№	Наименование элемента	Число отказов λ , 1/год
1	Зажим соединительный	0,11
2	Диод, используемый для заземления опор	0,31
3	ОКГТ	0,21
4	ТГЗ	0,21
5	Сдвоенный стальной проводник	0,31

Для определения вероятности безотказной работы можно использовать выражение:

$$F(t) = 1 - \lambda \cdot t. \quad (2.19)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы перечисленных ранее элементов для интервала времени в один год. Результаты расчётов представлены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Вероятность безотказной работы

№	Наименование элемента	$F(t)$
1	Зажим соединительный	0,99868
2	Диод, используемый для заземления опор	0,99628
3	ОКГТ (первый участок, на схеме с одним штрихом)	0,979
4	ОКГТ (второй участок, на схеме с двумя штрихами)	0,99748
5	ОКГТ (третий участок, на схеме с тремя штрихами)	0,98152
6	ТГЗ	0,99874
7	Сдвоенный стальной проводник заземляющего спуска	0,99748

Основным элементом, оказывающим решающее влияние на показатели надёжности системы группового заземления, является заземляющий спуск. В Таблице 2.3 приведены результаты расчётов показателей надёжности для различных значений интенсивности отказов заземляющих спусков троса группового заземления. В таблице функцией F обозначен показатель надёжности для предлагаемого способа заземления, а функцией F_0 – надёжность системы при существующем способе заземления. Значение функции F_0 можно определить по выражению:

$$F_0 = F_E \cdot F_4, \quad (2.20)$$

$$\delta = \frac{F - F_0}{F} \cdot 100\%. \quad (2.21)$$

Таблица 2.3 – Расчёт характеристик надёжности, число отказов ВОЛС – 1 за год

	Число отказов заземляющих спусков за год					
	0,25	0,5	1	5	15	20
F_5	0,997	0,994	0,988	0,94	0,82	0,76
F_A	0,89429	0,89429	0,89429	0,89429	0,89429	0,89429
F_B	0,90621	0,90621	0,90621	0,90621	0,90621	0,90621
F_C	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234
F_D	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365
F_E	0,99067	0,98769	0,98173	0,93403	0,81479	0,75518
Q_A	0,10571	0,10571	0,10571	0,10571	0,10571	0,10571
Q_B	0,09379	0,09379	0,09379	0,09379	0,09379	0,09379
Q_C	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766
Q_D	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635
Q_E	0,00933	0,01231	0,01827	0,06597	0,18521	0,24482
Q_a	0,23815	0,27357	0,33329	0,63328	1,06110	1,22000
Q_b	0,03216	0,02800	0,02298	0,01210	0,00722	0,00628
Q_c	0,03917	0,04500	0,05482	0,10417	0,17454	0,20068
F_a	0,76185	0,72643	0,66671	0,36672	0,06110	0,22000
F_b	0,96784	0,97200	0,97702	0,98790	0,99278	0,99372
F_c	0,96083	0,95500	0,94518	0,89583	0,82546	0,79932
Q_d	0,02850	0,02850	0,02850	0,02850	0,02850	0,02850
Q_e	0,42105	0,42105	0,42105	0,42105	0,42105	0,42105
Q_f	0,22275	0,22275	0,22275	0,22275	0,22275	0,22275
F_d	0,97150	0,97150	0,97150	0,97150	0,97150	0,97150
F_e	0,57895	0,57895	0,57895	0,57895	0,57895	0,57895
F_f	0,77725	0,77725	0,77725	0,77725	0,77725	0,77725
F_g	0,98940	0,98782	0,98516	0,97181	0,95277	0,94570
F_h	0,99908	0,99920	0,99934	0,99966	0,99979	0,99982
F_j	0,99127	0,98998	0,98779	0,97680	0,96112	0,95530
F_k	0,98849	0,98703	0,98452	0,97148	0,95257	0,94553
F	0,99988	0,99984	0,99977	0,99920	0,99776	0,99704
F_0	0,98942	0,98645	0,98049	0,93286	0,81377	0,75422
$\delta, \%$	1,05674	1,35811	1,96632	7,11154	22,60994	32,19447

Таблица 2.4 – Расчёт характеристик надёжности, число отказов ВОЛС – 2 за год

	Число отказов заземляющих спусков за год					
	0,25	0,5	1	5	15	20
F_5	0,997	0,994	0,988	0,94	0,82	0,76
F_A	0,79492	0,79492	0,79492	0,79492	0,79492	0,79492
F_B	0,81877	0,81877	0,81877	0,81877	0,81877	0,81877
F_C	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234	0,99234
F_D	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365	0,99365
F_E	0,99067	0,98769	0,98173	0,93403	0,81479	0,75518
Q_A	0,20508	0,20508	0,20508	0,20508	0,20508	0,20508
Q_B	0,18123	0,18123	0,18123	0,18123	0,18123	0,18123
Q_C	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766	0,00766
Q_D	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635	0,00635
Q_E	0,00933	0,01231	0,01827	0,06597	0,18521	0,24482
Q_a	0,23815	0,27357	0,33329	0,63328	1,06110	1,22000
Q_b	0,03216	0,02800	0,02298	0,01210	0,00722	0,00628
Q_c	0,03917	0,04500	0,05482	0,10417	0,17454	0,20068
F_a	0,76185	0,72643	0,66671	0,36672	0,06110	0,22000
F_b	0,96784	0,97200	0,97702	0,98790	0,99278	0,99372
F_c	0,96083	0,95500	0,94518	0,89583	0,82546	0,79932
Q_d	0,02899	0,02899	0,02899	0,02899	0,02899	0,02899
Q_e	0,82773	0,82773	0,82773	0,82773	0,82773	0,82773
Q_f	0,21895	0,21895	0,21895	0,21895	0,21895	0,21895
F_d	0,97101	0,97101	0,97101	0,97101	0,97101	0,97101
F_e	0,17227	0,17227	0,17227	0,17227	0,17227	0,17227
F_f	0,78105	0,78105	0,78105	0,78105	0,78105	0,78105
F_g	0,95957	0,95356	0,94342	0,89250	0,81988	0,79291
F_h	0,99907	0,99919	0,99933	0,99965	0,99979	0,99982
F_j	0,99142	0,99015	0,98800	0,97719	0,96178	0,95606
F_k	0,95868	0,95279	0,94279	0,89219	0,81971	0,79276
F	0,99833	0,99781	0,99676	0,98841	0,96753	0,95708
F_0	0,98942	0,98645	0,98049	0,93286	0,81377	0,75422
$\delta, \%$	0,90024	1,15185	1,65966	5,95534	18,89452	26,89633

На диаграмме Рисунок 2.21 приведено сравнение показателей надёжности существующей и предлагаемой системы заземления опор контактной сети.

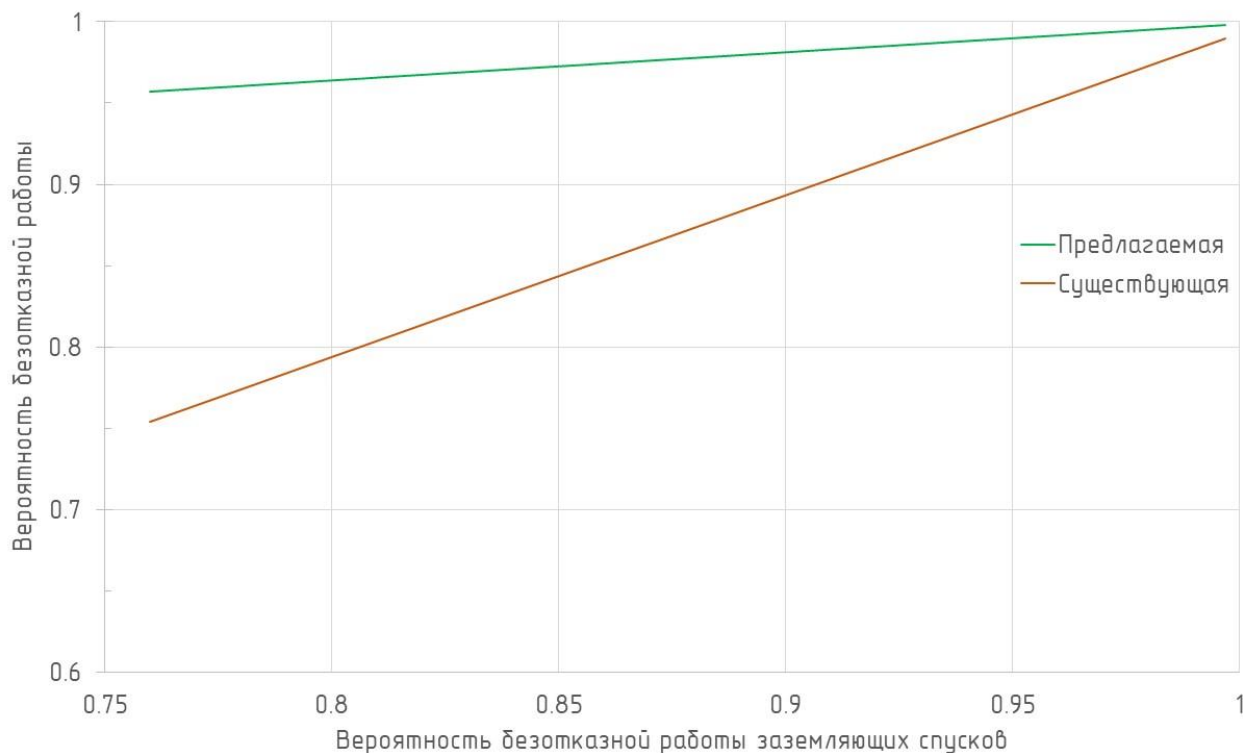


Рисунок 2.21 – Сравнение показателей надёжности, существующей и предлагаемой системы заземления

В результате проведённого анализа установлено, что для существующей системы заземления опор контактной сети существенное влияние на показатели надёжности оказывает работоспособность заземляющих спусков. Для предлагаемой системы двухуровневого заземления с использованием металлической оболочки ОКГТ, как следует из приведённого анализа, эта зависимость практически отсутствует, благодаря дополнительным соединениям с рельсовой цепью.

Величина прироста показателя надёжности, выраженная в процентах, как функция от количества отказов заземляющих спусков приведена на диаграмме,

Рисунок 2.22. Зависимость построена для случаев, когда на участке за год наблюдалось один и два обрыва волоконно-оптической линии связи.

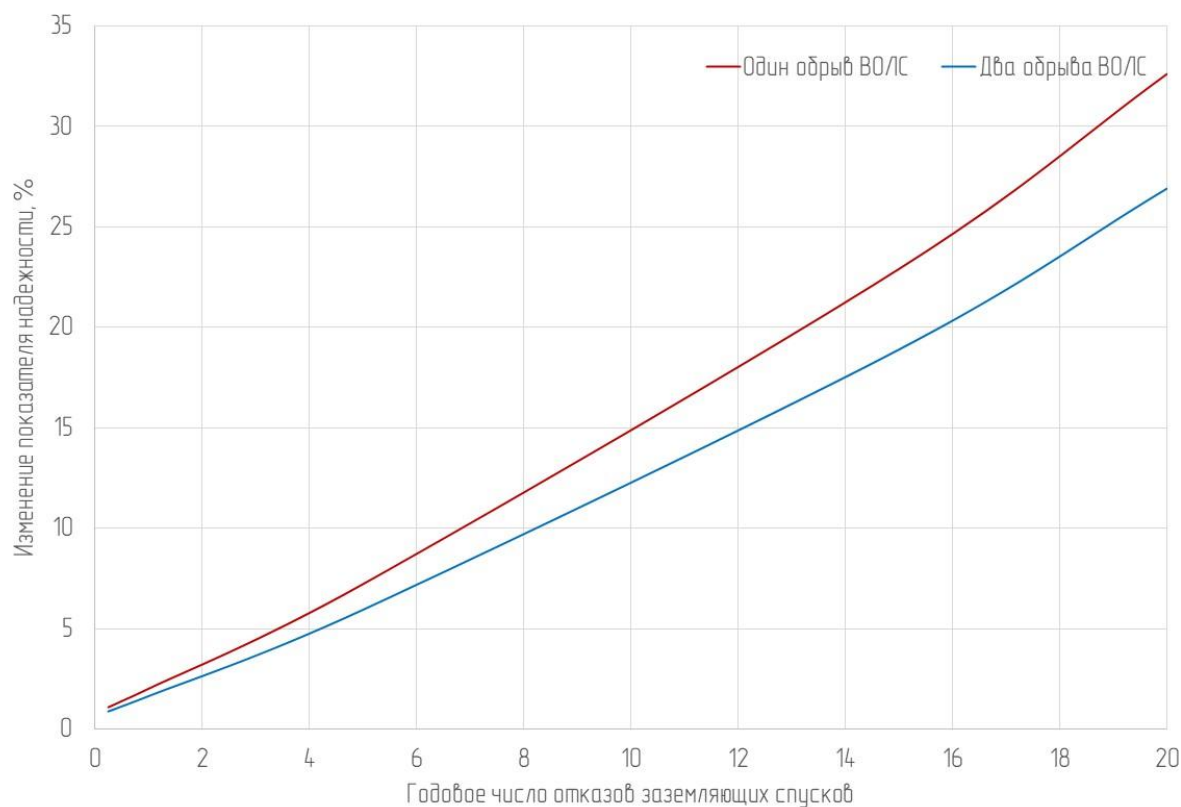


Рисунок 2.22 – Изменение показателя надёжности предлагаемой системы заземления относительно существующей

Проведённый анализ однозначно позволяет утверждать, что внедрение предлагаемого технического решения кроме прочего, позволит существенно повысить надёжность системы группового заземления опор контактной сети.

2.7 Выводы по главе

Во второй главе проанализированы схемные варианты подключения металлической оболочки ВОЛС к тросу группового заземления и обоснован оптимальный вариант организации предлагаемой системы группового заземления

опор контактной сети. Для выбранного варианта был выполнен анализ всей системы группового заземления в различных режимах работы.

Составлена полная электрическая схема замещения двухуровневой системы группового заземления, в которой разрабатываемая система рассматривается как однородная линия с распределёнными параметрами, имеющая взаимоиндуктивные связи с соседними проводниками.

Для борьбы с гололёдно-изморозевыми отложениями на волоконно-оптических линиях связи, выполняемых тросом типа ОКГТ, предложено несколько технических решений. Варианты плавки гололёда на ОКГТ, основанные на существующих принципах плавки на железных дорогах постоянного тока адаптированы к новой схеме заземления опор контактной сети.

Дана оценка надёжности проектируемой системы группового заземления с применением металлической оболочки ВОЛС. Выполненный расчёт показал, что предлагаемая система заземления опор по сравнению с существующей имеет более высокие показатели надёжности, в среднем на 16 % превышающие показатели надёжности существующей системы заземления.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВОЛС

3.1 Постановка вопроса

Внедрение, разрабатываемой в диссертационной работе, системы группового заземления опор позволит увеличить чувствительность системы релейной защиты на участках постоянного тока. Указанный результат достигается за счёт снижения сопротивления петли короткого замыкания, благодаря введению в цепь обратного тока дополнительного проводника, роль которого выполняет металлическая оболочка ОКГТ. Снижение сопротивления петли короткого замыкания увеличит токи КЗ в зоне слабой чувствительности органов релейной защиты. Для оценки степени эффективности предлагаемого решения необходимо выполнить расчёт токов аварийного режима, возникающих при внедрении предлагаемого способа заземления опор, с последующим их сравнением с токами КЗ аналогичных режимов при существующих схемах заземления опор.

Использование традиционных методов определения токов короткого замыкания, описанных ранее [7, 72] для предлагаемого способа организации системы группового заземления становится невозможным, ввиду того, что между ТГЗ, рельсом и металлической оболочкой ОКГТ, выполняющей роль дополнительного заземляющего проводника, образуются множественные электрические связи, расположение которых зависит от места возникновения КЗ. Применение методик, разработанных для существующих способов заземления опор, в которых используется дополнительный проводник, также невозможно, так как в них дополнительные проводники секционированы посередине межподстанционной зоны. Объясняется это тем, что способ заземления, рассматриваемый в диссертационной работе, предполагает использование в качестве дополнительного проводника ОКГТ, который кроме функции заземления опор является каналом для передачи информации.

Результаты исследований опубликованы [78–81].

3.2 Математическая модель режима короткого замыкания в контактной сети с дополнительным заземлением на металлическую оболочку ВОЛС

3.2.1 Принципы построения математической модели для расчёта токов КЗ и принятые в работе допущения

Схема замещения участка группового заземления может быть построена как набор Г-образных модулей, где продольная составляющая определяется сопротивлением одного пролёта ТГЗ, а поперечная составляющая – сопротивлением тела опоры, включающее переходное сопротивление заземления фундамента опоры. Количество таких модулей для участка постоянного тока будет зависеть от принимаемого расстояния между опорами. Для системы постоянного тока участки группового заземления имеют нормируемую длину при Г-образной схеме заземления опор в 1200 метров [33], следовательно, таких модулей будет 15–20. Каждый модуль может иметь собственные характеристики, однако на начальном этапе исследования будем считать неизменными вдоль всего участка сопротивление участка ТГЗ – R_T и сопротивление опоры $R_{оп}$.

Схема замещения участка группового заземления для расчёта тока короткого замыкания при одностороннем питании контактной сети представлена на Рисунке 3.1. Приняты следующие обозначения элементов:

$R_{КС}$ – сопротивление контактной сети от тяговой подстанции до точки КЗ;

$R_{р1}$, $R_{р2}$ – эквивалентное сопротивление двух ниток рельсов от места электрического соединения с ОКГТ до точки подключения заземляющего спуска участка ТГЗ, где произошло КЗ, левее и правее соответственно;

$R_{A'}$, $R_{B'}$ – сопротивление ОКГТ от места присоединения к контуру тяговых подстанций до электрического соединения с рельсом слева и справа;

$R_{A''}$, $R_{B''}$ – эквивалентное сопротивление двух ниток рельсов от места присоединения к контуру тяговых подстанций металлической оболочки ОКГТ слева и справа соответственно;

$R_{ТП}$ – сопротивление тяговой подстанций, включающее сопротивление понижающих трансформаторов, выпрямительно-инверторных преобразователей и сопротивление внешней энергосистемы;

$R_{ОП}$ – сопротивление тела опоры, включающее переходное сопротивление опора – земля;

R_T – сопротивление одного пролёта троса группового заземления.

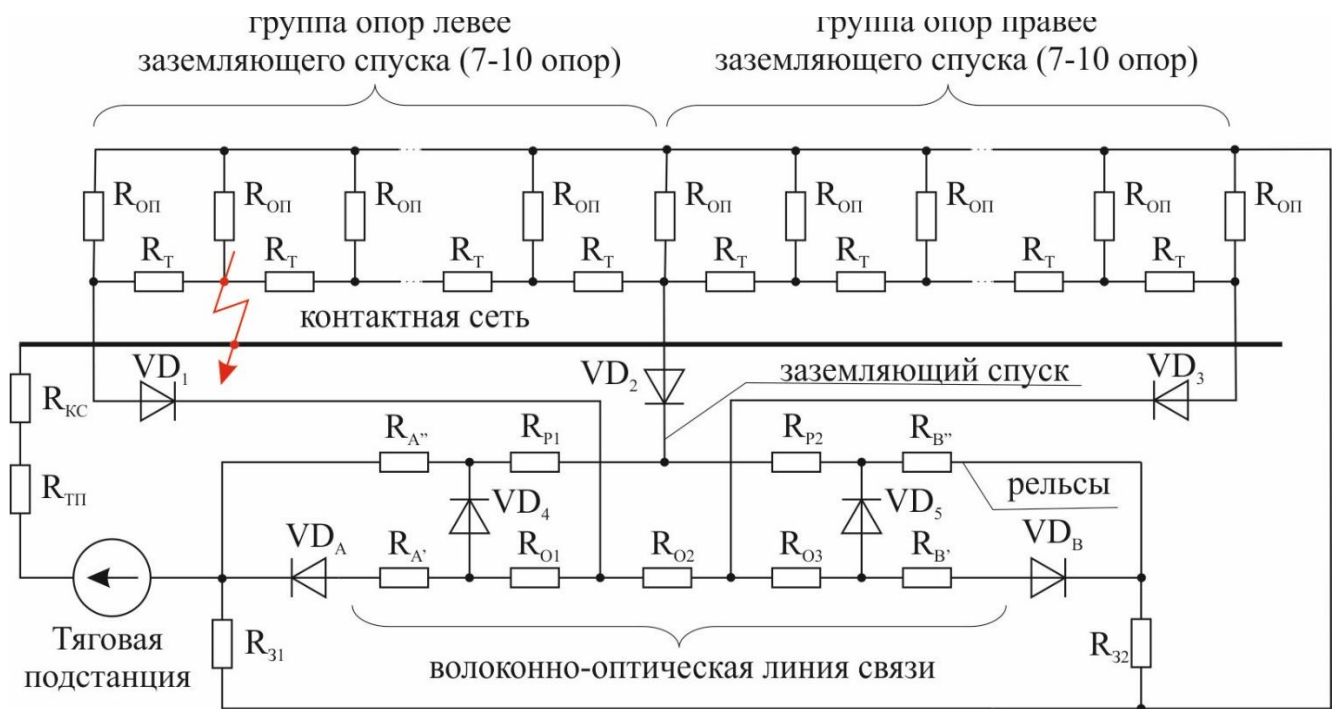


Рисунок 3.1 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ при одностороннем питании контактной сети

Схема замещения цепей обратного тока представлена цепью рельсового пути и цепью, образуемой металлической оболочкой ОКГТ. Сопротивления R_{O1} и R_{O3} учитывают активную составляющую сопротивления ОКГТ от ближайшей точки заземления ОКГТ на рельс до точки соединения ОКГТ и ТГЗ. Сопротивление R_{O2} учитывает сопротивление ОКГТ между точками присоединения к ТГЗ. ОКГТ заземляется непосредственно на цепи отсоса подстанций, а сопротивления контура заземления подстанций R_{31} и R_{32} введены для учёта тока, стекающего с опор контактной сети повреждённого участка.

Как видно из представленной схемы, существующий трос группового заземления присоединяется двумя дополнительными шлейфами к металлической оболочке волоконно-оптической линии связи через диоды. Наличие диодов позволяет току короткого замыкания беспрепятственно стекать с ТГЗ в ОКГТ, одновременно с этим при возникновении аварийной ситуации, диоды исключают попадание тока короткого замыкания на соседние группы опор, благодаря весьма большому сопротивлению обратнo смещённых *PN*-переходов диодных вентилей соседних участков ТГЗ. Учитывая сказанное, при построении математической модели участка группового заземления, наличие соседних участков не будет оказывать влияние на токораспределение расчётного участка и поэтому учитываться не будет. Точки присоединения к ОКГТ соседних участков группового заземления опор при построении модели также указываться не будут, по описанным выше причинам.

На Рисунке 3.2 представлена схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ при двустороннем питании контактной сети.

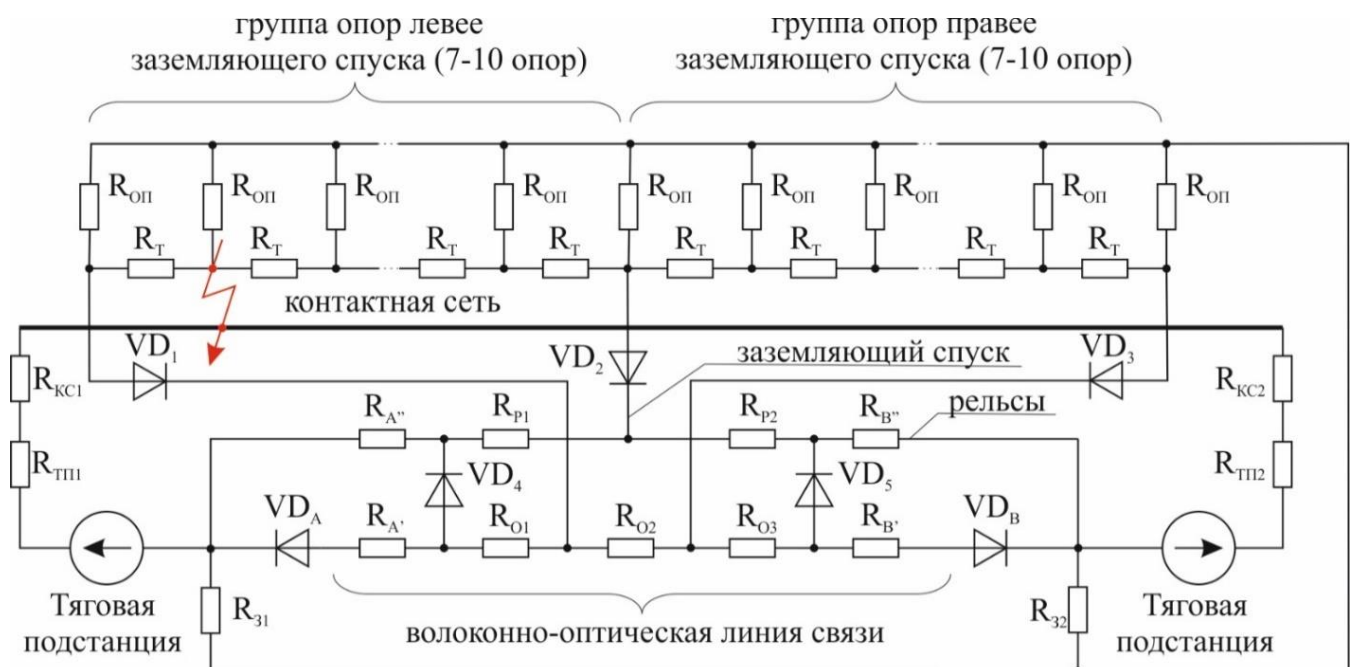


Рисунок 3.2 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ при двустороннем питании контактной сети

На Рисунке 3.2 дополнительно к введённым ранее для Рисунка 3.1, приняты следующие обозначения:

$R_{КС1}$, $R_{КС2}$ – сопротивление контактной сети от тяговых подстанций до точки КЗ, левее и правее соответственно;

$R_{ТП1}$, $R_{ТП2}$ – сопротивление тяговых подстанций, включающие сопротивление понижающих трансформаторов, выпрямительно-инверторных преобразователей и сопротивление внешней энергосистемы.

Использование предлагаемых схем дополнительного заземления опор требует разработки математического аппарата, позволяющего осуществить расчёт токов короткого замыкания во всех возможных вариантах работы участка железной дороги постоянного тока, для используемых на сегодняшний день способов организации питания межподстанционных зон. Один из путей достижения поставленной задачи является создание математической модели, учитывающей особенности дополнительного способа заземления опор КС, и позволяющей определить токи короткого замыкания в тяговой сети.

На первом этапе создания математической модели будем принимать во внимание все гальванические связи, возникающие между тросом группового заземления опор и отрицательным полюсом источника питания – тяговой подстанцией. Искровые промежутки, если они включены в цепь заземления, будем полагать замкнутыми, в результате возникшего короткого замыкания. Как следует из схем, представленных на Рисунках 3.1 и 3.2, ток короткого замыкания будет стекать на подстанцию по нескольким путям: через заземляющий спуск по рельсам и частично по земле, через трос ОКГТ непосредственно на подстанцию и частично в рельсовую цепь, через тело опоры и арматуру контактной сети в землю.

Определение величины тока короткого замыкания в рассматриваемом случае актуально для расчёта уставок релейной защиты, а следовательно, наибольший интерес представляет значение тока КЗ в наиболее неблагоприятном случае, когда сопротивление петли протекания тока будет максимальным. Таким требованиям будут соответствовать погодные условия, при которых переходное сопротивление

между рельсами и землёй максимально – сухая жаркая погода, либо сильный мороз. С учётом сделанной оговорки, при построении модели ток, стекающий с рельсов в землю, учитываться не будет, полагая, что рельсовый путь надёжно изолирован от проводящей поверхности земли. Такое допущение только ужесточит расчётную модель, так как в условиях конечного значения переходного сопротивления рельс – земля реальный ток короткого замыкания будет по понятным причинам больше.

Представленные на Рисунках 3.1 и 3.2 схемы весьма громоздки для упрощения, поэтому рассмотрим возможность их упрощения, исключив элементы, влияние которых несущественно. Для оценки возможности упрощения этих схем оценим степень влияния сопротивления опоры на точность расчёта сопротивления петли короткого замыкания. Упростим расчётную модель, приняв, что в схеме отсутствует дополнительный заземляющий проводник, и весь ток короткого замыкания будет стекать по ТГЗ через заземляющий спуск и тело опор участка. Приведённое упрощение существенно облегчит процесс анализа, одновременно повысив расчётное значение доли тока при аварии, стекающего в землю через опору. Очевидно, что, если в результате расчёта по данной модели будет показано, что проводимость опор несущественно влияет на расчётное значение токов КЗ, можно будет сделать аналогичный вывод для схем, показанных на Рисунках 3.1 и 3.2.

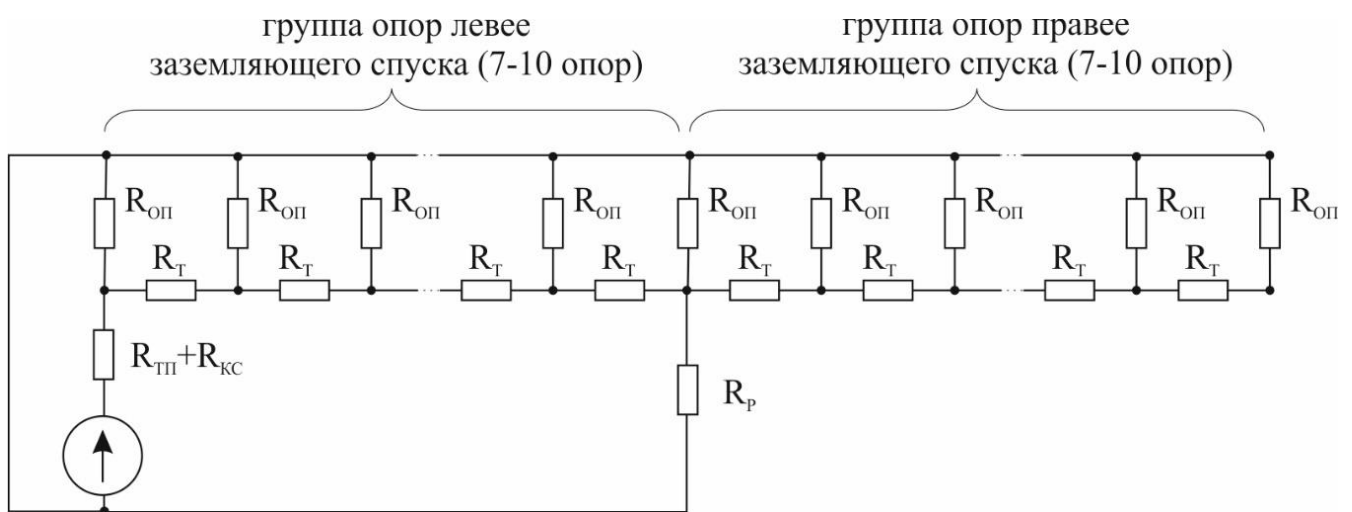


Рисунок 3.3 – Схема замещения участка группового заземления опор без дополнительного проводника

Анализировать будем случай одностороннего питания, когда весь ток короткого замыкания будет возвращаться на одну подстанцию. Рассмотрим полученную схему замещения, которая представлена на Рисунке 3.3. Принятые здесь обозначения сопротивлений аналогичны обозначениям на Рисунке 3.1, за исключением сопротивления R_P , являющимся на схеме сопротивлением рельсового пути от ТП до точки КЗ. Точка КЗ расположена на максимальном удалении, слева от заземляющего спуска. Известно [73], что входное сопротивление цепи, составленное из « m » Г-образных полузвеньев, и замкнутых на сопротивление R_X , с учётом обозначений, принятых на Рисунке 3.3, определяется выражением:

$$Z_{BX} = \frac{R_X \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{OP}} + R_T \cdot R_{OP} \cdot th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)}{\sqrt{R_T \cdot R_{OP}} + R_X \cdot th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)}. \quad (3.1)$$

Используя выражение 3.1, преобразуем участок цепи, расположенный правее заземляющего спуска, включая опору, по которой спускается заземляющий проводник. Учитывая сделанное замечание, примем что цепочка замкнута на сопротивление опоры, в итоге получим:

$$\begin{aligned} R_{BX(II)} &= \frac{R_{OP} \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{OP}} + R_T \cdot R_{OP} \cdot th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)}{\sqrt{R_T \cdot R_{OP}} + R_{OP} \cdot th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)} = \\ &= \frac{\sqrt{R_T \cdot R_{OP}} + R_T \cdot th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)}{\sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} + th \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{OP}}} \right)}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Сопротивление, на которое замкнута цепочка из « m » Г–образных полувеньев, расположенных левее заземляющего спуска, определяется выражением:

$$R_0 = \frac{R_p \cdot R_{\text{BX(II)}}}{R_p + R_{\text{BX(II)}}}. \quad (3.3)$$

Сопротивление обратного пути тока короткого замыкания определим, используя выражение 3.1 как:

$$Z_{\text{от}} = \frac{R_0 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{\text{оп}}} + R_T \cdot R_{\text{оп}} \cdot \text{th} \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{оп}}}} \right)}{\sqrt{R_T \cdot R_{\text{оп}}} + R_0 \cdot \text{th} \left(m \cdot \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{оп}}}} \right)}. \quad (3.4)$$

Очевидно, что положив сопротивление тела опоры бесконечно большим величина сопротивления обратного пути тока короткого замыкания:

$$Z_{\text{от}} = R_p + m \cdot R_T, \quad (3.5)$$

где m – число пролётов ТГЗ левее заземляющего спуска.

Проведём сравнительный анализ результатов расчёта по выражениям 3.4 и 3.5, изменяя положение заземляющего спуска, и перемещая его от подстанции вглубь межподстанционной зоны, вплоть до её середины.

Сопротивление опоры примем минимально допустимым, при котором ещё используют схемы группового заземления опор, равным 100 Ом.

Рельсовый путь выполнен рельсами Р65 с погонным сопротивлением $\rho_p = 0,0154$ Ом/км.

В качестве ТГЗ завешен трос типа ПБСМ2–70 с удельным сопротивлением $\rho_{\text{ТГЗ}} = 0,66$ Ом/км.

Полагая расстояние между опорами равным 0,06 км. Результат расчёта приведён на Рисунке 3.4.

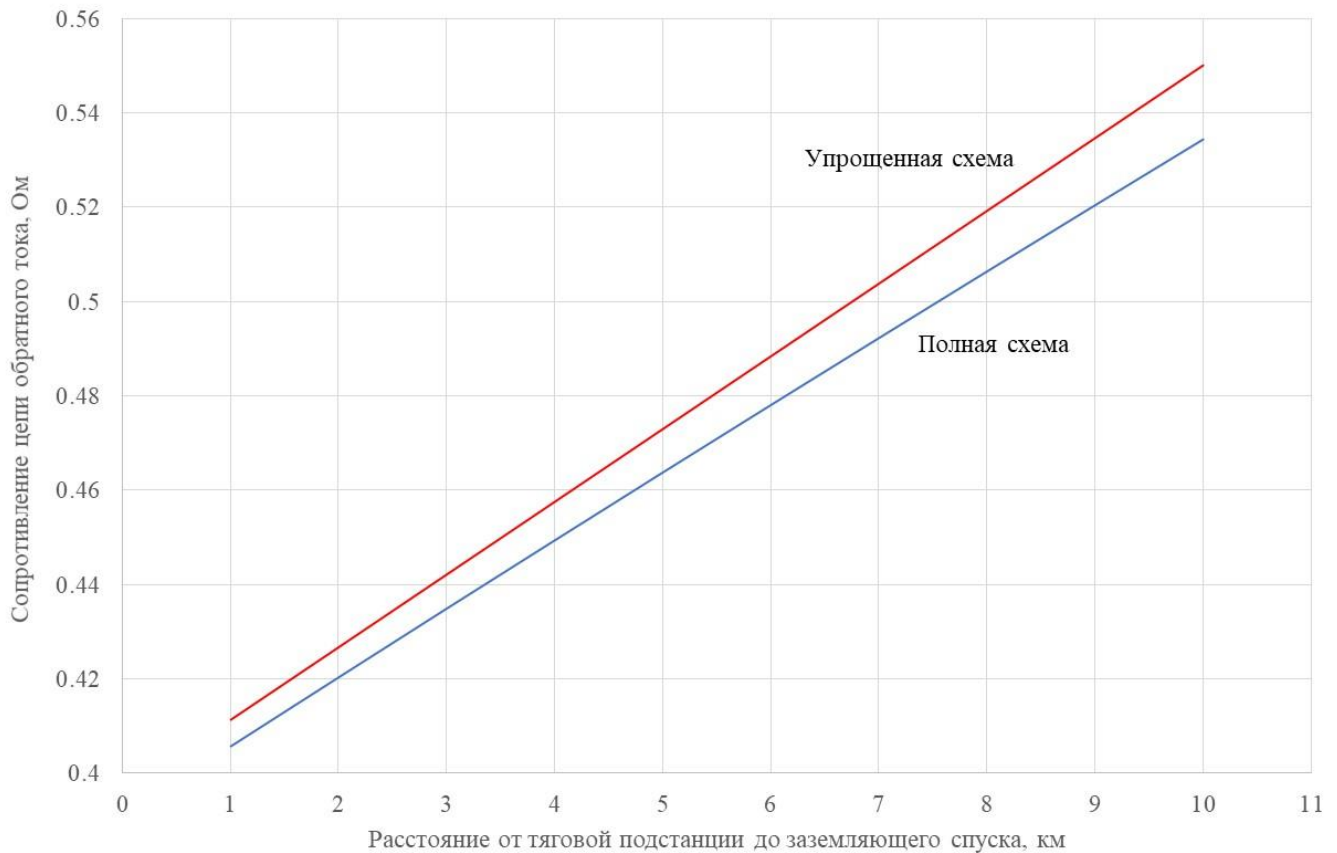


Рисунок 3.4 – Сравнительный анализ расчёта по выражения 3.4 и 3.5

Как видно из диаграммы, приведённой на Рисунке 3.4, отказ от учёта сопротивления опор незначительно влияет на результат расчёта, однако для окончательного принятия решения о возможности такого шага определим относительную погрешность расчёта сопротивления цепи обратного тока при КЗ для различных значений сопротивлений опор контактной сети. На Рисунке 3.5 приведена зависимость относительной погрешности расчёта как функция от расстояния до точки КЗ при различных значениях сопротивления опоры.

Из полученных зависимостей следует, что сделанное выше допущение, о возможности исключить из расчётной модели сопротивления опор КЗ приведёт к появлению дополнительной погрешности, не превышающей 3 %, что допустимо.

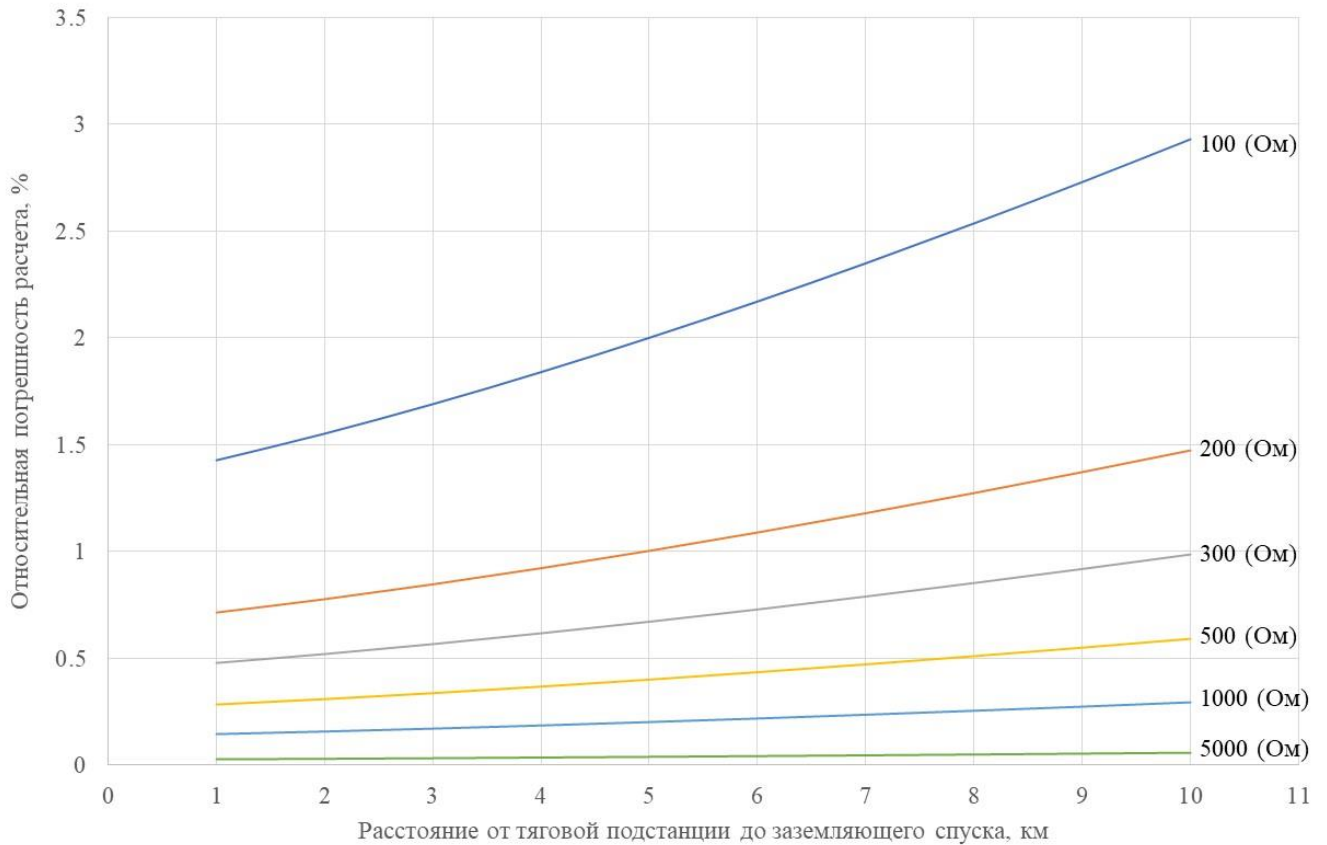


Рисунок 3.5 – Зависимость относительной погрешности расчёта сопротивления пути обратного тока при КЗ при различных значениях сопротивления опор КС

Важно также учесть, что в проведённом анализе не учтён факт ответвления тока в ОКГТ, что снизит рассчитанную погрешность. Кроме этого, при расчёте тока КЗ дополнительно будет учитываться сопротивление контактной сети до места КЗ и сопротивление ТП, увеличивающее суммарное сопротивление цепи КЗ и очевидно снижающее значение относительной погрешности расчёта сопротивления.

3.2.2 Модель системы группового заземления опор при одностороннем питании контактной сети для расчёта токов короткого замыкания

С точки зрения классической электротехники электрическая схема, приведённая на Рисунке 3.1 является простой, так как содержит только один источник энергии, в данном случае это тяговая подстанция [75]. Вместе с тем

необходимо учесть, что рассматриваемая схема является нелинейной, а потому строго говоря, должна быть рассчитана с использованием соответствующего математического аппарата. Однако, для проведения расчётов примем во внимание тот факт, что в моменты, когда точка КЗ располагается левее традиционного заземляющего спуска, потенциал рельса в месте его соединения с диодом заземляющего спуска будет очевидно меньше потенциала в точке присоединения правого заземляющего шлейфа ТГЗ–ОКГТ. Диод VD_5 будет закрыт, и данную ветвь необходимо исключить из расчётной схемы. Пользуясь аналогичными рассуждениями, исключаем левый заземляющий шлейф с диодом VD_4 для случаев, когда точка КЗ располагается правее традиционного заземляющего спуска. При этом остальные диоды, показанные на схеме, будут открыты. Таким образом, расчёт по схеме, приведённой на Рисунке 3.1 необходимо вести по двум различным схемам замещения, в зависимости от того, где расположена точка КЗ – левее или правее заземляющего спуска. Такой подход позволяет рассчитывать нелинейную электрическую цепь методами расчёта линейных электрических цепей.

С учётом принятых допущений, модель участка железной дороги постоянного тока можно значительно упростить, без существенной потери в точности проводимых расчётов.

На Рисунке 3.6 приведена расчётная схема, для случая, когда точка КЗ находится левее заземляющего спуска.

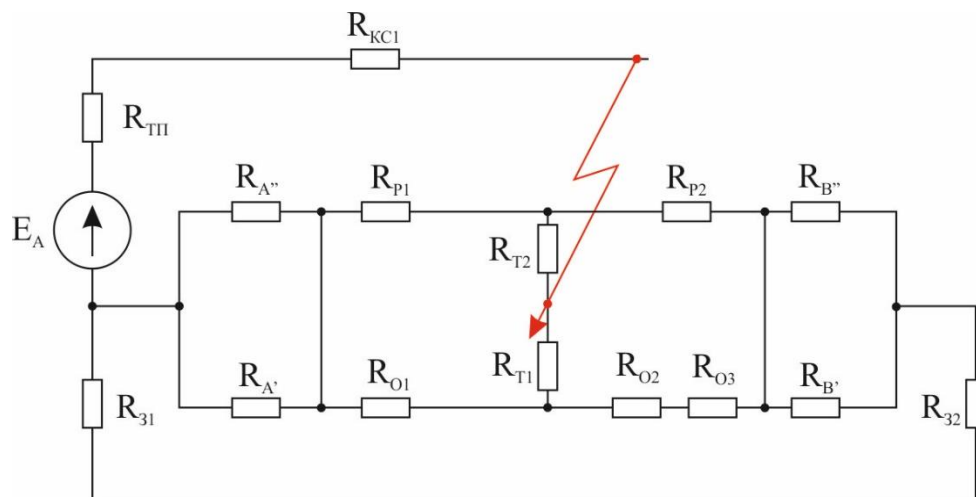


Рисунок 3.6 – Расчётная схема, когда точка КЗ левее заземляющего спуска

Используемые в схеме обозначения соответствуют ранее принятым на Рисунке 3.1. Кроме этого, вновь введены элементы:

R_{T1} – сопротивление участка существующего ТГЗ от начала до места короткого замыкания;

R_{T2} – сопротивление участка существующего ТГЗ от места короткого замыкания до заземляющего спуска.

Расчёт по указанным схемам величины тока короткого замыкания предполагает использование метода эквивалентных преобразований [75]. В процессе расчёта следует заменить всю разветвлённую сеть сопротивлений одним эквивалентным сопротивлением. Произведём эквивалентное преобразование схемы, когда точка КЗ левее заземляющего спуска (Рисунок 3.6). Введём следующие обозначения:

$$R_A = \frac{R_{A''} \cdot R_{A'}}{R_{A''} + R_{A'}}, \quad R_{B^*} = \frac{R_{B''} \cdot R_{B'}}{R_{B''} + R_{B'}} + R_{31} + R_{32},$$

$$R_{O4} = R_{O2} + R_{O3}.$$

Перерисуем расчётную схему заново с учётом произведённых упрощений (Рисунок 3.7).

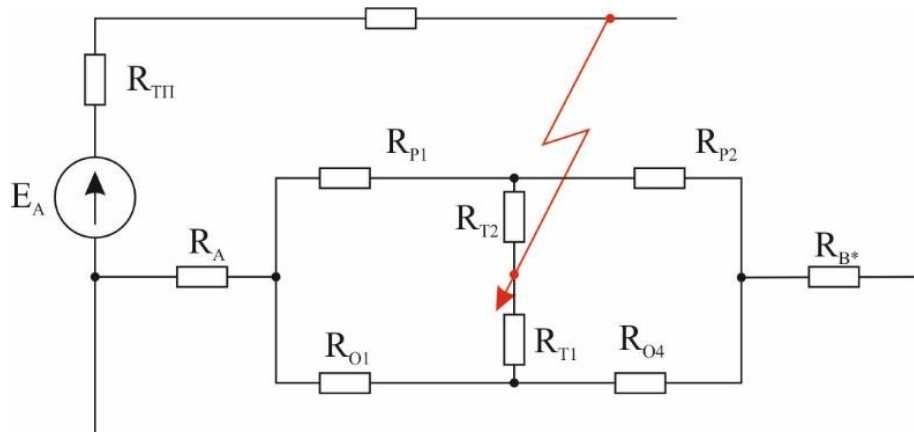


Рисунок 3.7 – Преобразование схемы

Выполним преобразование звезды $R_A - R_{P1} - R_{O1}$ в треугольник $R_1 - R_2 - R_3$:

$$R_1 = R_A + R_{P1} + \frac{R_A \cdot R_{P1}}{R_{O1}}, R_2 = R_{O1} + R_{P1} + \frac{R_{O1} \cdot R_{P1}}{R_A}, R_3 = R_A + R_{O1} + \frac{R_A \cdot R_{O1}}{R_{P1}}.$$

Преобразуем звезду $R_{B^*} - R_{P2} - R_{O4}$ в треугольник $R_4 - R_5 - R_6$:

$$R_4 = R_{O4} + R_{P2} + \frac{R_{O4} \cdot R_{P2}}{R_{B^*}}, R_5 = R_{B^*} + R_{P2} + \frac{R_{B^*} \cdot R_{P2}}{R_{O4}}, R_6 = R_{O4} + R_{B^*} + \frac{R_{O4} \cdot R_{B^*}}{R_{P2}}.$$

На Рисунке 3.8 представлена упрощённая схема замещения.

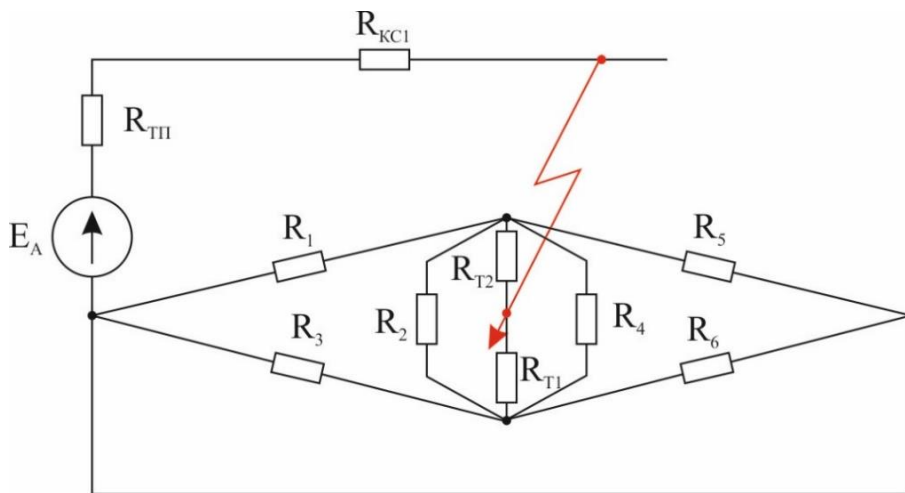


Рисунок 3.8 – Преобразование схемы

Далее заменим параллельно включённые элементы:

$$R_7 = \frac{R_5 \cdot R_1}{R_5 + R_1}, R_8 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4}, R_9 = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}.$$

На Рисунке 3.9 показана схема после выполненных упрощений.

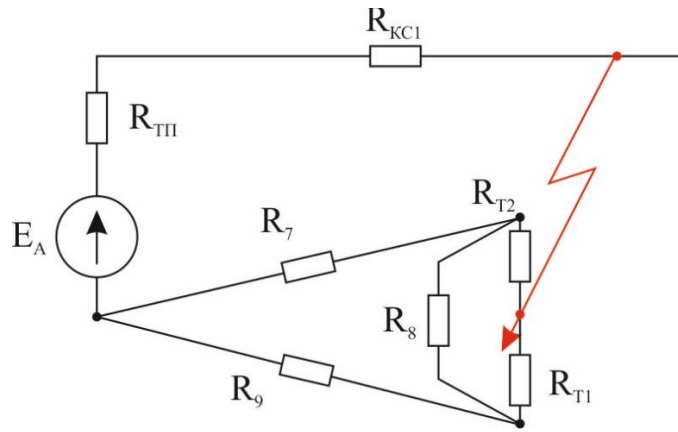


Рисунок 3.9 – Преобразование схемы

Преобразуем треугольник $R_7 - R_8 - R_9$ в звезду $R_{10} - R_{11} - R_{12}$:

$$R_{10} = \frac{R_7 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9}, \quad R_{11} = \frac{R_7 \cdot R_8}{R_7 + R_8 + R_9}, \quad R_{12} = \frac{R_8 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9}.$$

Покажем преобразование схемы на Рисунке 3.10.

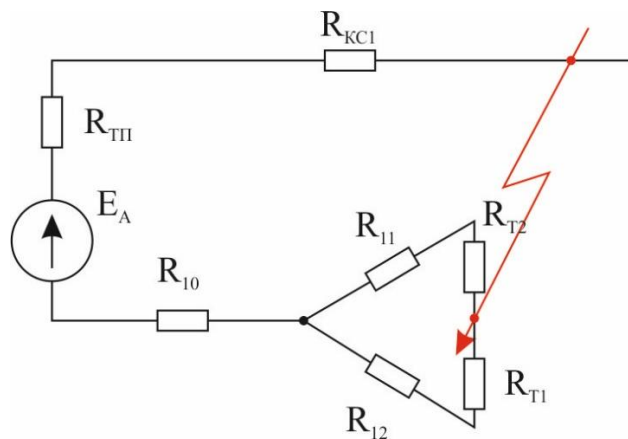


Рисунок 3.10 – Преобразование схемы

Окончательно запишем:

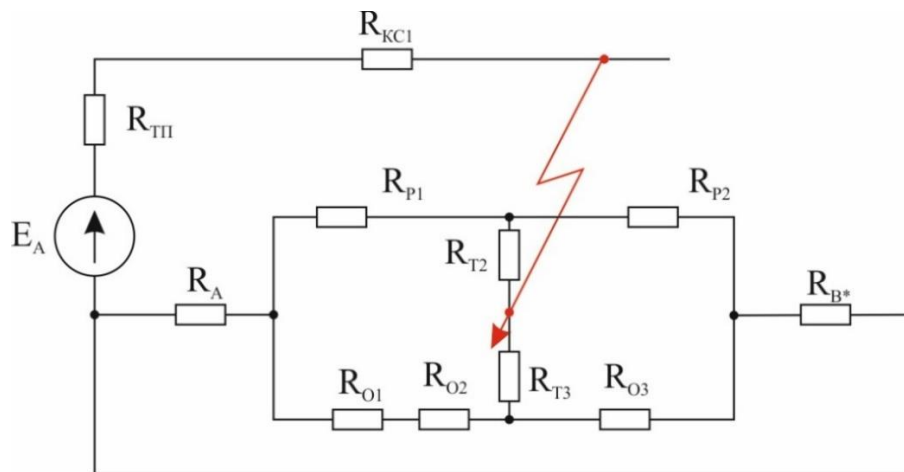
$$R_{\Sigma} = R_{III} + R_{KC1} + R_{10} + \frac{(R_{11} + R_{T1}) \cdot (R_{12} + R_{T2})}{R_{11} + R_{T1} + R_{12} + R_{T2}}. \quad (3.6)$$

Ток короткого замыкания определяется по закону Ома:

$$I_{\text{КЗ}_i} = \frac{E}{R_{\Sigma_i}} \quad (3.7)$$

Используя описанную методику, можно рассчитать ток КЗ до момента, пока точка будет располагаться левее заземляющего спуска, либо непосредственно в точке присоединения спуска.

Для случая, когда точка КЗ расположена правее заземляющего спуска следует использовать схему Рисунок 3.11.



Рисунке 3.11 – Расчётная схема, когда точка КЗ правее заземляющего спуска

В схеме приняты следующие новые обозначения:

R_{T2} – сопротивление участка существующего ТГЗ от места короткого замыкания до заземляющего спуска;

R_{T3} – сопротивление участка существующего ТГЗ от места короткого замыкания до конца участка.

Начнём упрощение схемы с преобразования последовательно соединённых элементов:

$$R_{O4} = R_{O1} + R_{O2}.$$

С учётом упрощения схемы преобразуем звезду $R_A - R_{P1} - R_{O4}$ в треугольник $R_1 - R_2 - R_3$:

$$R_1 = R_A + R_{P1} + \frac{R_A \cdot R_{P1}}{R_{O4}}, \quad R_2 = R_{O4} + R_{P1} + \frac{R_{O4} \cdot R_{P1}}{R_A}, \quad R_3 = R_A + R_{O4} + \frac{R_A \cdot R_{O4}}{R_{P1}}.$$

Преобразуем звезду $R_{B^*} - R_{P2} - R_{O3}$ в треугольник $R_4 - R_5 - R_6$:

$$R_4 = R_{O3} + R_{P2} + \frac{R_{O3} \cdot R_{P2}}{R_{B^*}}, \quad R_5 = R_{B^*} + R_{P2} + \frac{R_{B^*} \cdot R_{P2}}{R_{O3}},$$

$$R_6 = R_{O3} + R_{B^*} + \frac{R_{O3} \cdot R_{B^*}}{R_{P2}}.$$

На Рисунке 3.12 представлена расчётная схема после проведённых преобразований.

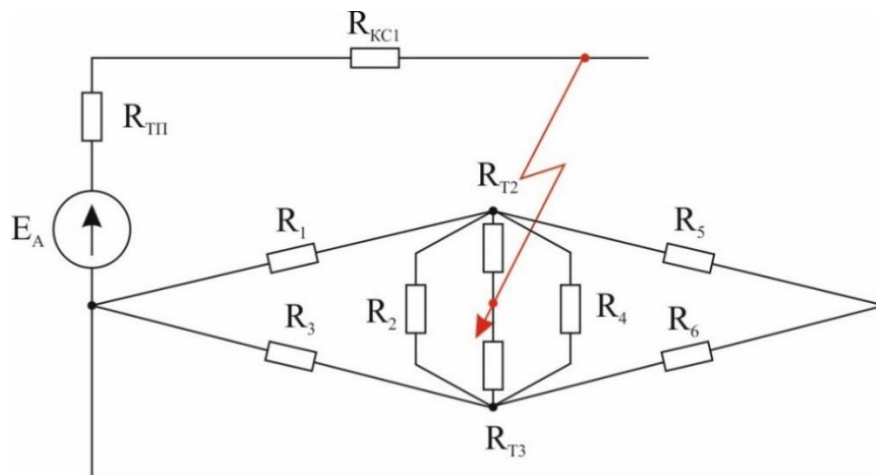


Рисунок 3.12 – Преобразование схемы

Остальные преобразования необходимо вести по ранее приведённым выражениям, аналогично действиям начиная с Рисунка 3.8.

3.2.3 Модель для расчёта токов короткого замыкания на однопутном участке при двустороннем питании контактной сети

Для решения задачи расчёта токов короткого замыкания участка железной дороги постоянного тока с двусторонним питанием используем схему, показанную на Рисунке 3.2. Для упрощения расчётов на первом этапе рассмотрим режимы работы всех показанных на схеме нелинейных элементов – полупроводниковых диодов. Вентили VD_A и VD_B соединяют ВОЛС непосредственно с контуром заземления тяговых подстанций. Во всех рассуждениях будем полагать, что напряжение холостого хода на шинах подстанции одинаково, и уравнительный ток отсутствует. Очевидно, что эти диоды всегда будут смещены в прямом направлении и работать на линейной части вольтамперной характеристики, так как их катоды присоединяются к точкам с минимальным потенциалом, а токи короткого замыкания значительно превосходят значения токов вентилях в нелинейном диапазоне. Диоды $VD_1 - VD_3$ при возникновении короткого замыкания будут открыты, так как потенциал этих анодов будет значительно выше потенциала катодов – потенциала заземлённого ОКГТ. Диоды VD_4 и VD_5 располагаются по схеме ближе к отрицательному полюсу источников, и будут открыты при КЗ оба. Заменяем все указанные выше диоды проводниками с нулевым сопротивлением, так как ввиду малой величины активного сопротивления открытого диода в дальнейших рассуждениях этой величиной можно пренебречь.

На следующем этапе обратимся к исследованиям, проводимым ранее. Было показано, что влияние сопротивления опоры на точность расчёта тока короткого замыкания невелико, а возможность исключить сопротивление опоры из расчётной модели сильно упрощает алгоритм расчёта и снижает трудоёмкость расчёта, делая возможным выполнить расчёт, не прибегая к использованию вычислительной техники. Таким образом заменим сопротивления всех опор разрывами цепи, избавившись одновременно от дополнительной связи с контурами заземления тяговых подстанций.

В результате выполненных преобразований и объединений элементов получена схема замещения, показанная на Рисунке 3.13. Расчёты токов КЗ при двустороннем питании также будут вестись по двум схемам, когда точка КЗ располагается левее и правее заземляющего спуска.

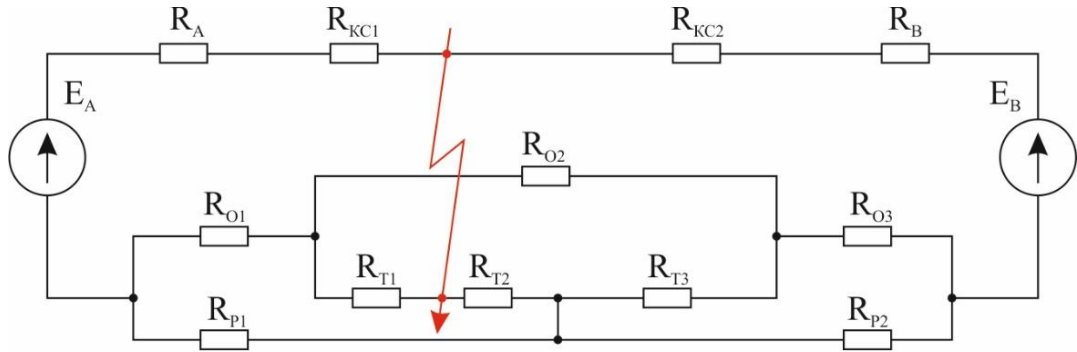


Рисунок 3.13 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ, когда точка КЗ расположена левее заземляющего спуска

В этой схеме:

$$R_A = \frac{R_{A'} \cdot R_{A''}}{R_{A'} + R_{A''}} + R_{\text{III1}}, \quad R_B = \frac{R_{B'} \cdot R_{B''}}{R_{B'} + R_{B''}} + R_{\text{III2}}.$$

R_{T1} – сопротивление ТГЗ от места присоединения к ОКГТ слева до места КЗ;

R_{T2} – то же от места КЗ до заземляющего спуска;

R_{T3} – то же от заземляющего спуска до места присоединения к ОКГТ справа.

Преобразуем схему:

$$R_1 = R_A + R_{\text{KC1}}, \quad R_2 = R_B + R_{\text{KC2}}.$$

Треугольник $R_{O3} - R_{P2} - R_{T3}$ преобразуем в звезду $R_3 - R_4 - R_5$:

$$R_3 = \frac{R_{T3} \cdot R_{P2}}{R_{T3} + R_{P2} + R_{O3}},$$

$$R_4 = \frac{R_{T3} \cdot R_{O3}}{R_{T3} + R_{P2} + R_{O3}},$$

$$R_5 = \frac{R_{O3} \cdot R_{P2}}{R_{T3} + R_{P2} + R_{O3}}.$$

На Рисунке 3.14 представлена преобразованная схема замещения.

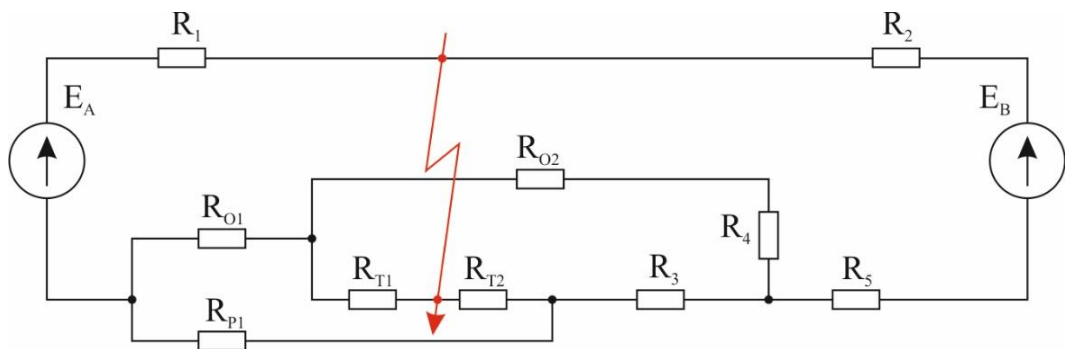


Рисунок 3.14 – Преобразование схемы

Следующим шагом заменим звезду $R_{P1} - R_{T2} - R_3$ треугольником $R_6 - R_7 - R_8$:

$$R_6 = R_{P1} + R_{T2} + \frac{R_{P1} \cdot R_{T2}}{R_3},$$

$$R_7 = R_3 + R_{T2} + \frac{R_3 \cdot R_{T2}}{R_{P1}},$$

$$R_8 = R_3 + R_{P1} + \frac{R_3 \cdot R_{P1}}{R_{T2}}.$$

Преобразуем:

$$R_9 = R_5 + R_2, R_{10} = R_4 + R_{O2}.$$

Результаты преобразования показаны на Рисунке 3.15.

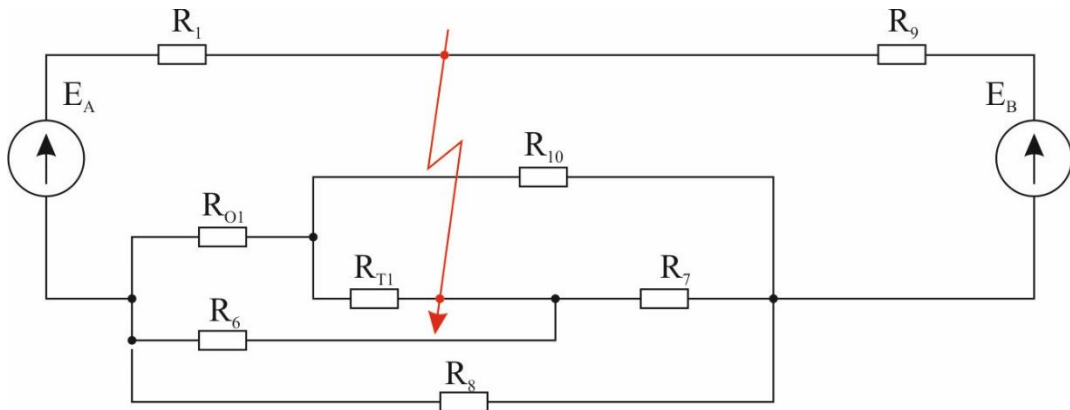


Рисунок 3.15 – Преобразование схемы

Заменяем звезду $R_{01} - R_{10} - R_{T1}$ треугольником $R_{11} - R_{12} - R_{13}$, результат преобразования показан на Рисунке 3.16:

$$R_{11} = R_{01} + R_{T1} + \frac{R_{01} \cdot R_{T1}}{R_{10}}, \quad R_{12} = R_{10} + R_{T1} + \frac{R_{10} \cdot R_{T1}}{R_{01}}, \quad R_{13} = R_{01} + R_{10} + \frac{R_{01} \cdot R_{10}}{R_{T1}}.$$

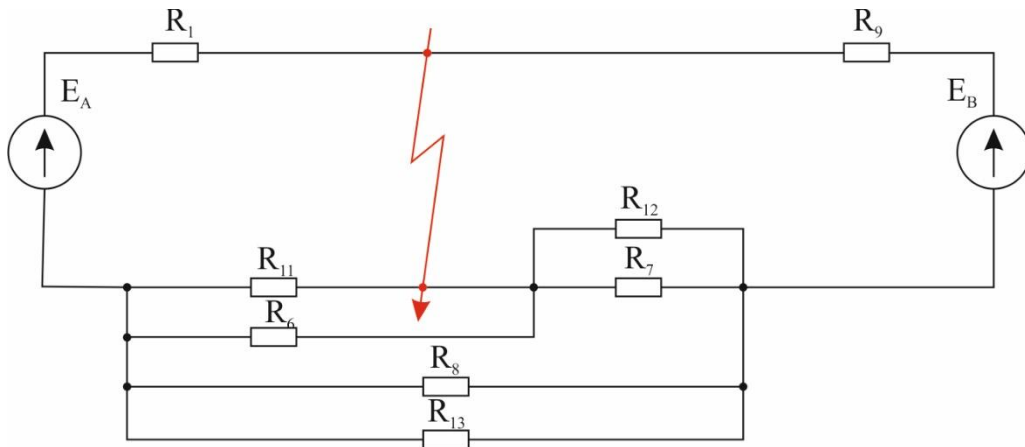


Рисунок 3.16 – Преобразование схемы

Далее выполним преобразование, которое представлено на Рисунке 3.17:

$$R_{14} = \frac{R_6 \cdot R_{11}}{R_6 + R_{11}}, \quad R_{15} = \frac{R_{12} \cdot R_7}{R_{12} + R_7}, \quad R_{16} = \frac{R_{13} \cdot R_8}{R_{13} + R_8}.$$

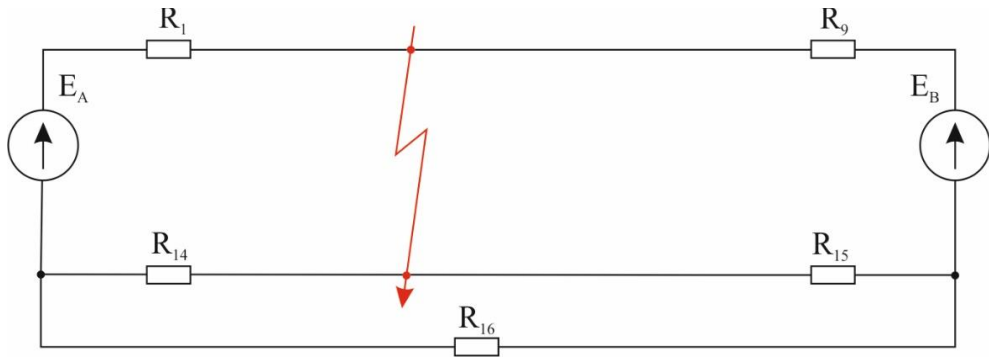


Рисунок 3.17 – Преобразование схемы

Треугольник $R_{14} - R_{15} - R_{16}$ преобразуем в звезду $R_{17} - R_{18} - R_{19}$, результат преобразования показан на Рисунке 3.18:

$$R_{17} = \frac{R_{14} \cdot R_{15}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}, \quad R_{18} = \frac{R_{14} \cdot R_{16}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}, \quad R_{19} = \frac{R_{14} \cdot R_{16}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}.$$

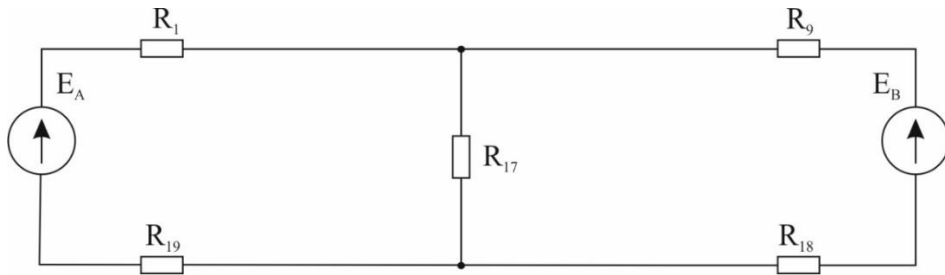


Рисунок 3.18 – Преобразование схемы

Следующим этапом преобразуем (Рисунок 3.19):

$$R_{20} = R_1 + R_{19}, \quad R_{21} = R_9 + R_{18}.$$

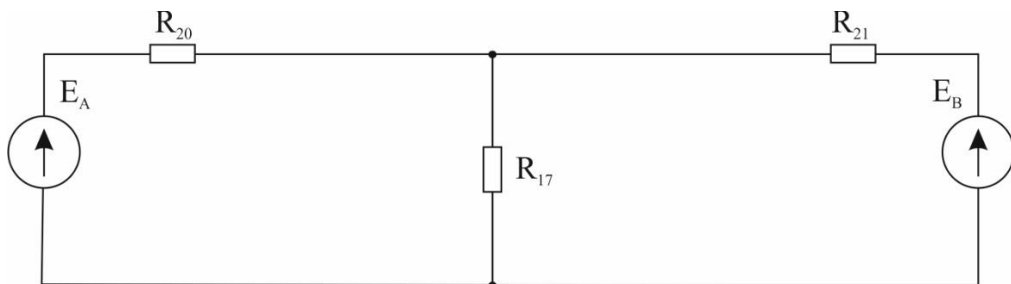


Рисунок 3.19 – Преобразование схемы

Учитывая тот факт, что напряжения на шинах подстанций равны по принятым выше условиям преобразования, а их внутренние сопротивления были вынесены и учтены при упрощении схемы, преобразуем схему путём соединения в одну точку положительных выводов обоих источников. Таким образом, сопротивления R_{20} и R_{21} окажутся включёнными параллельно, а схема превратится в простую, так как в ней будет действовать только один источник э.д.с.

Окончательно, сопротивление петли короткого замыкания определим по выражению:

$$R = R_{17} + \frac{R_{20} \cdot R_{21}}{R_{20} + R_{21}}.$$

Для нахождения полного (неразложенного) тока короткого замыкания следует воспользоваться законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}}. \quad (3.8)$$

Ток короткого замыкания будет распределяться по тяговым подстанциям обратно пропорционально сопротивлению, и может быть определён с использованием формулы разброса [75]:

$$I_A = I \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}} \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot R_{21}}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}},$$

$$I_B = I \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}} \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot R_{20}}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}}.$$

Окончательно запишем:

$$I_A = \frac{U}{R_{17} \cdot R_{20} / R_{21} + R_{17} + R_{20}}. \quad (3.9)$$

$$I_B = \frac{U}{R_{17} \cdot R_{21} / R_{20} + R_{17} + R_{21}}. \quad (3.10)$$

Полученные, в данном разделе, формулы для расчёта токов короткого замыкания будут справедливы до момента, пока точка КЗ не перейдёт через место присоединения традиционного заземляющего спуска.

Далее, для выполнения расчёта необходимо, как и в предыдущем случае построить вторую схему замещения (Рисунок 3.20).

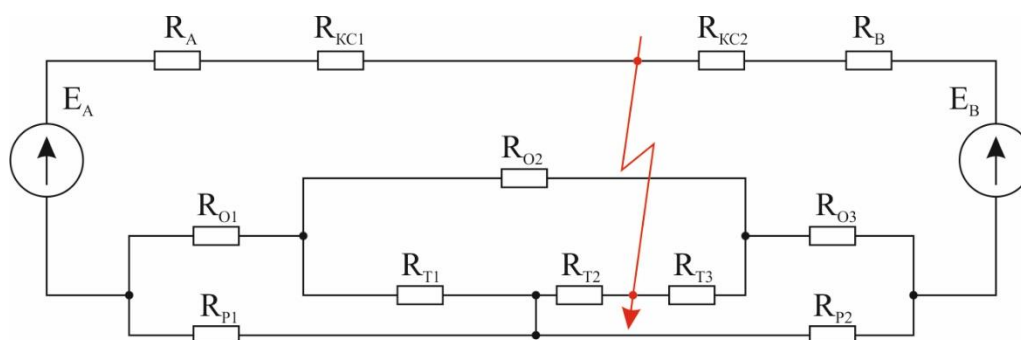


Рисунок 3.20 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ, когда точка КЗ расположена правее заземляющего спуска

В этой схеме:

R_{T1} – сопротивление ТГЗ от места КЗ до места присоединения к ОКГТ справа;

R_{T2} – то же от заземляющего спуска до места КЗ;

R_{T3} – то же от места присоединения к ОКГТ слева до заземляющего спуска.

Остальные обозначения соответствуют принятым ранее.

Первым шагом выполним преобразование треугольника $R_{O1} - R_{P1} - R_{T1}$ в звезду $R_3 - R_4 - R_5$ (Рисунок 3.21):

$$R_3 = \frac{R_{T1} \cdot R_{P1}}{R_{T1} + R_{P1} + R_{O1}}, \quad R_4 = \frac{R_{T1} \cdot R_{O1}}{R_{T1} + R_{P1} + R_{O1}}, \quad R_5 = \frac{R_{O1} \cdot R_{P1}}{R_{T1} + R_{P1} + R_{O1}}.$$

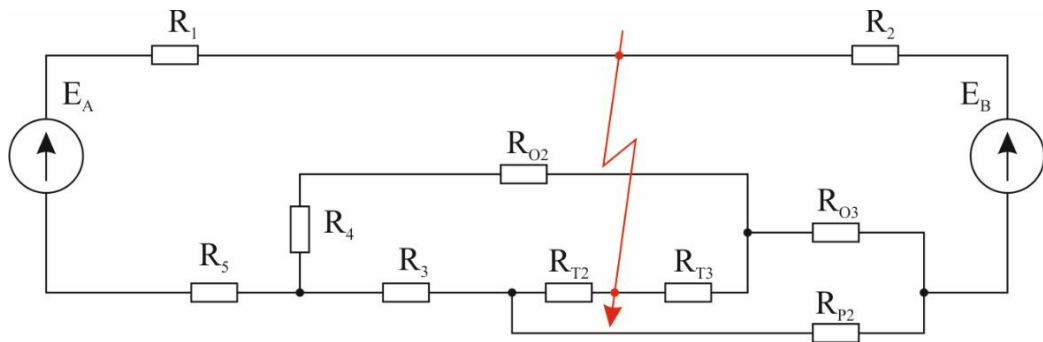


Рисунок 3.21 – Преобразование схемы

Далее заменим звезду $R_{P2} - R_{T2} - R_3$ треугольником $R_6 - R_7 - R_8$:

$$R_6 = R_{P2} + R_{T2} + \frac{R_{P2} \cdot R_{T2}}{R_3}, \quad R_7 = R_3 + R_{T2} + \frac{R_3 \cdot R_{T2}}{R_{P2}}, \quad R_8 = R_3 + R_{P2} + \frac{R_3 \cdot R_{P2}}{R_{T2}}.$$

Следующим этапом заменим последовательно соединённые сопротивления:

$$R_9 = R_5 + R_1, \quad R_{10} = R_4 + R_{O2}.$$

Преобразования представлены на Рисунке 3.22.

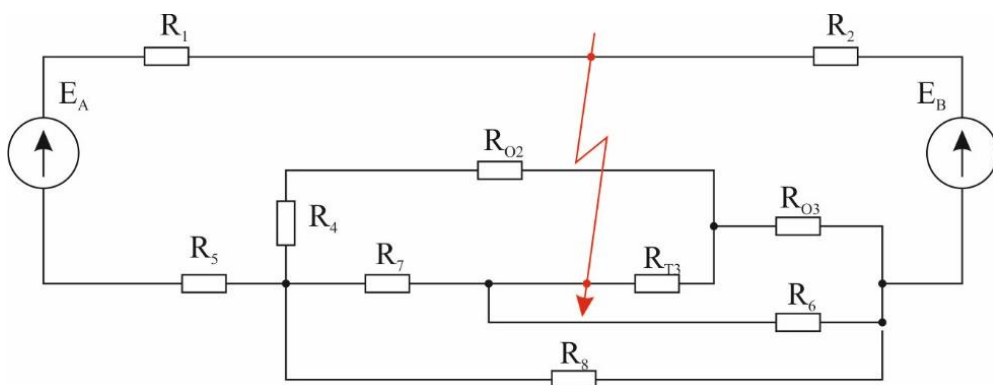


Рисунок 3.22 – Преобразование схемы

Заменим звезду $R_{O3} - R_{10} - R_{T1}$ треугольником $R_{11} - R_{12} - R_{13}$ (Рисунок 3.23):

$$R_{11} = R_{O3} + R_{T3} + \frac{R_{O3} \cdot R_{T3}}{R_{10}}, \quad R_{12} = R_{10} + R_{T3} + \frac{R_{10} \cdot R_{T3}}{R_{O3}}, \quad R_{13} = R_{O3} + R_{10} + \frac{R_{O3} \cdot R_{10}}{R_{T3}}.$$

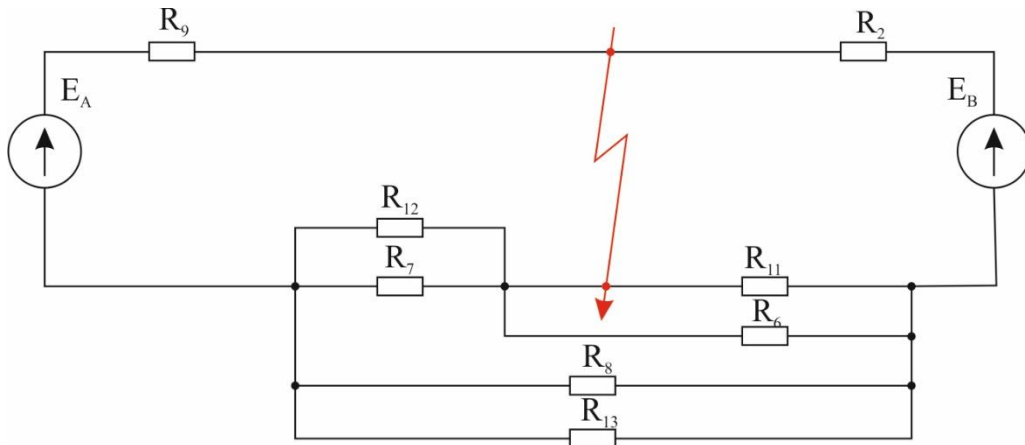


Рисунок 3.23 – Преобразование схемы

Далее преобразуем параллельно соединённые сопротивления:

$$R_{14} = \frac{R_6 \cdot R_{11}}{R_6 + R_{11}}, \quad R_{15} = \frac{R_{12} \cdot R_7}{R_{12} + R_7}, \quad R_{16} = \frac{R_{13} \cdot R_8}{R_{13} + R_8}.$$

Схема приобрела вид, Рисунок 3.24.

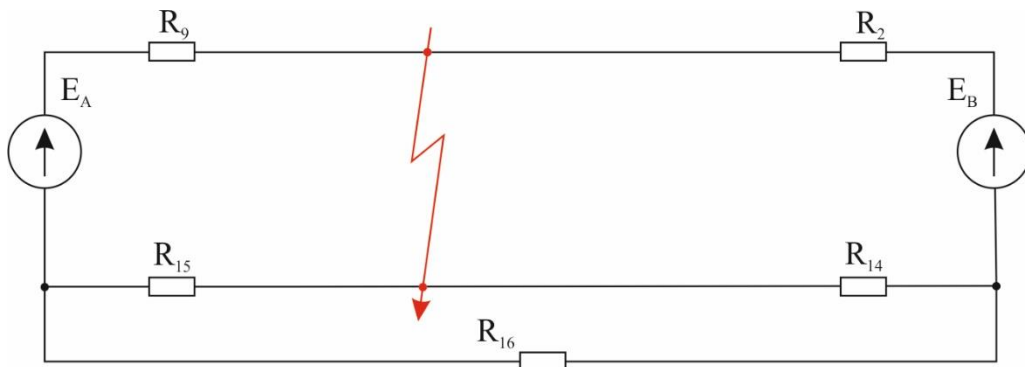


Рисунок 3.24 – Преобразование схемы

Треугольник $R_{14} - R_{15} - R_{16}$ преобразуем в звезду $R_{17} - R_{18} - R_{19}$, Рисунок 3.25:

$$R_{17} = \frac{R_{14} \cdot R_{15}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}, \quad R_{18} = \frac{R_{14} \cdot R_{16}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}, \quad R_{19} = \frac{R_{14} \cdot R_{16}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}}.$$

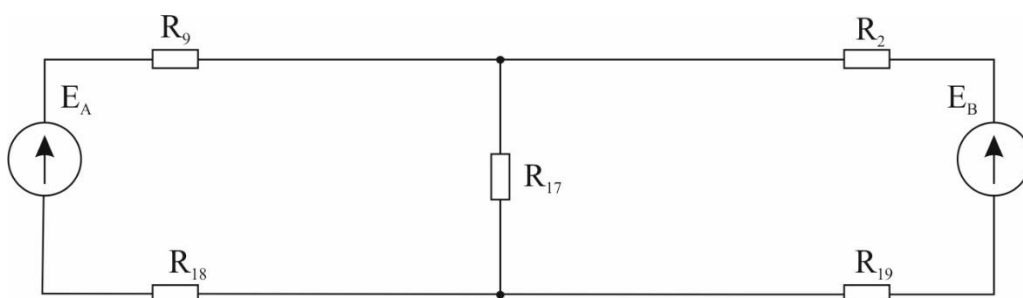


Рисунок 3.25 – Преобразование схемы

Выполним преобразование, Рисунок 3.26:

$$R_{20} = R_2 + R_{19}, \quad R_{21} = R_9 + R_{18}.$$

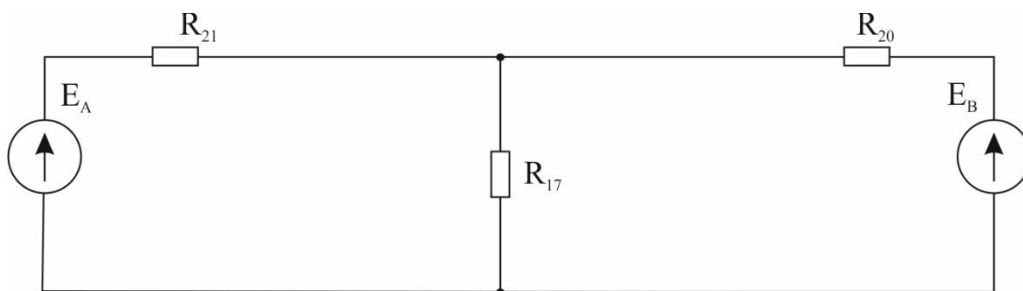


Рисунок 3.26 – Преобразование схемы

Окончательно, с учётом ранее сделанных замечаний, сопротивление петли короткого замыкания определим по выражению:

$$R = R_{17} + \frac{R_{20} \cdot R_{21}}{R_{20} + R_{21}}.$$

Для нахождения полного (неразложенного) тока короткого замыкания следует воспользоваться законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}}.$$

Ток короткого замыкания будет распределяться по тяговым подстанциям обратно пропорционально сопротивлению, и может быть определён с использованием формулы разброса [75]:

$$I_A = I \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}} \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot R_{20}}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}},$$

$$I_B = I \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot (R_{20} + R_{21})}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}} \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{U \cdot R_{21}}{R_{17} \cdot (R_{20} + R_{21}) + R_{20} \cdot R_{21}}.$$

Окончательно запишем:

$$I_A = \frac{U}{R_{17} \cdot R_{21} / R_{20} + R_{17} + R_{21}}. \quad (3.11)$$

$$I_B = \frac{U}{R_{17} \cdot R_{20} / R_{21} + R_{17} + R_{20}}. \quad (3.12)$$

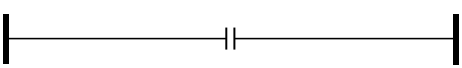
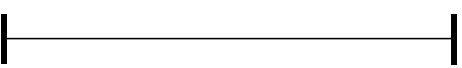
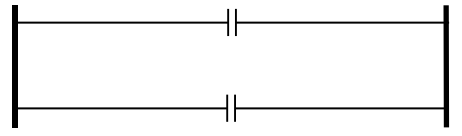
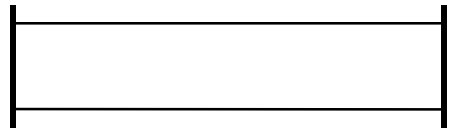
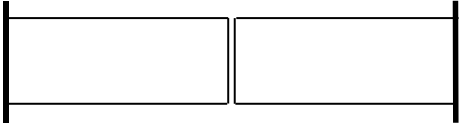
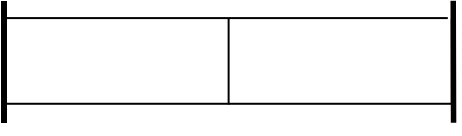
3.2.4 Методика расчёта токов короткого замыкания двухпутных участков

В предыдущих разделах подробно рассмотрен математический аппарат для расчёта токов короткого замыкания для случая двустороннего и одностороннего питания на участках постоянного тока. Существующие в настоящее время схемы питания участков электрифицированных железных дорог не ограничиваются

рассмотренными ранее двумя случаями. Наиболее распространенные схемы питания участков электрифицированных дорог приведены в Таблице 3.1.

Используя соотношения, приводимые в настоящей главе, можно рассчитать токи короткого замыкания для схем (а) – (в), причём схема (в) сводится к схеме (а) с учётом того, что сопротивление рельсов будет в два раза меньше, так как четыре нитки рельсов соединены параллельно вместо двух в схеме (а).

Таблица 3.1 – Схемы питания участков электрифицированных дорог

	Одностороннее питание	Двустороннее питание
Однопутный участок	 (а)	 (б)
Двухпутный участок	 (в)	 (г)
Двухпутный участок	 (д)	 (е)

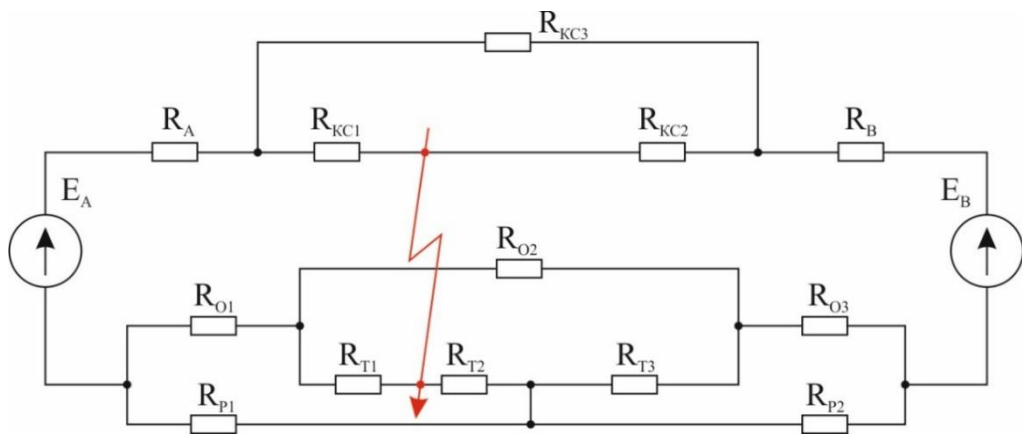


Рисунок 3.27 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ двухпутного участка

Рассмотрим более подробно методику расчёта для схемы (г). Свести эту схему к схеме (б) без дополнительных изменений в методике расчёта нельзя, так как при КЗ на одном пути будет происходить подпитка КЗ через контактную сеть второго пути. Рассмотрим расчётную схему для указанного случая, Рисунок 3.27.

Вне зависимости от того, где расположена точка короткого замыкания, правее либо левее существующего заземляющего спуска необходимо преобразовать треугольник сопротивлений $R_{KC1} - R_{KC2} - R_{KC3}$.

$$R_{KC21} = \frac{R_{KC1} \cdot R_{KC2}}{R_{KC1} + R_{KC2} + R_{KC3}}, R_{KC22} = \frac{R_{KC2} \cdot R_{KC3}}{R_{KC1} + R_{KC2} + R_{KC3}}, R_{KC23} = \frac{R_{KC3} \cdot R_{KC1}}{R_{KC1} + R_{KC2} + R_{KC3}}.$$

В результате схема будет иметь вид, показанный на Рисунке 3.28:

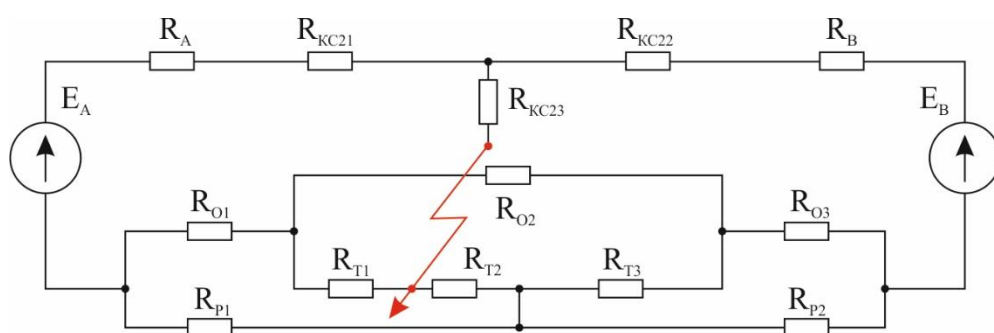


Рисунок 3.28 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ двухпутного участка после преобразования

Сравнивая полученную схему со схемами на Рисунках 3.13 и 3.20 можно сделать вывод, что они практически идентичны, с учётом замены R_{KC1} на R_{KC21} , R_{KC2} на R_{KC22} и введением между точками КЗ дополнительного сопротивления R_{KC23} . Проследив весь путь преобразования, приводимый выше для схем, изображённых на Рисунках 3.13 и 3.20 можно заметить, что дополнительное сопротивление R_{KC23} окажется включённым последовательно с сопротивлением R_{17} , Рисунки 3.18 и 3.25. С учётом сделанных замечаний, вне зависимости от положения точки КЗ – до или

после существующего заземляющего спуска для данного типа схем сопротивление R_{17} следует определять по приводимому выражению:

$$R_{17} = \frac{R_{14} \cdot R_{15}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}} + R_{\text{КС}23}. \quad (3.13)$$

Весь остальной расчёт следует проводить согласно изложенным выше соображениям. В зависимости от того, для какого пути определяют токи короткого замыкания следует назначать сопротивления $R_{\text{КС}1}$ и $R_{\text{КС}2}$ – для расчётного пути, $R_{\text{КС}3}$ – для смежного пути.

Для выполнения расчётов токов короткого замыкания в узловой схеме питания контактной сети – схема (е) её следует предварительно преобразовать к виду схемы (г). На Рисунке 3.29 приведена схема замещения для данного случая.

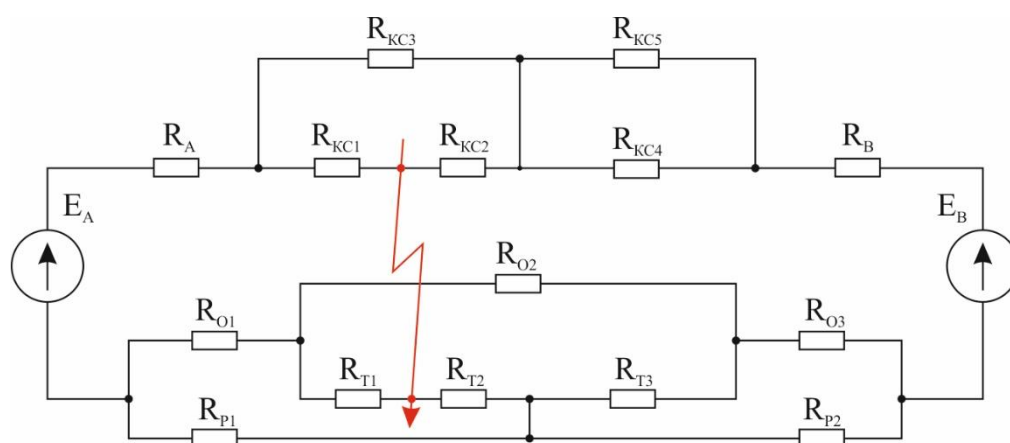


Рисунок 3.29 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ двухпутный участок, узловая схема, КЗ до поста секционирования

В схеме сопротивления $R_{\text{КС}4}$ и $R_{\text{КС}5}$ учитывают сопротивление контактной сети каждого из путей участка, расположенного «за постом секционирования», по отношению к месту возникновения КЗ. Очевидно, эти два сопротивления соединены параллельно и могут быть преобразованы в одно. Одновременно с этим внесём изменения в расчёт сопротивления R_B . Для приведения данной схемы к схеме

двустороннего раздельного питания, показанной на Рисунке 3.26, сопротивление R_B следует рассчитывать по выражению:

$$R_B = \frac{R_{B'} \cdot R_{B''}}{R_{B'} + R_{B''}} + \frac{R_{KC4} \cdot R_{KC5}}{R_{KC4} + R_{KC5}} + R_{ТП2}. \quad (3.14)$$

Если значение тока КЗ определяют для участка расположенного справа от поста секционирования, следует в схеме на Рисунке 3.29 поменять местами секции контактной сети $R_{KC1} - R_{KC2} - R_{KC3}$ и $R_{KC4} - R_{KC5}$, и вместо сопротивления R_B изменить расчётную формулу для сопротивления R_A :

$$R_A = \frac{R_{A'} \cdot R_{A''}}{R_{A'} + R_{A''}} + \frac{R_{KC4} \cdot R_{KC5}}{R_{KC4} + R_{KC5}} + R_{ТП1}. \quad (3.15)$$

На Рисунке 3.30 показана схема встречно-петлевого питания с обозначением точки короткого замыкания.

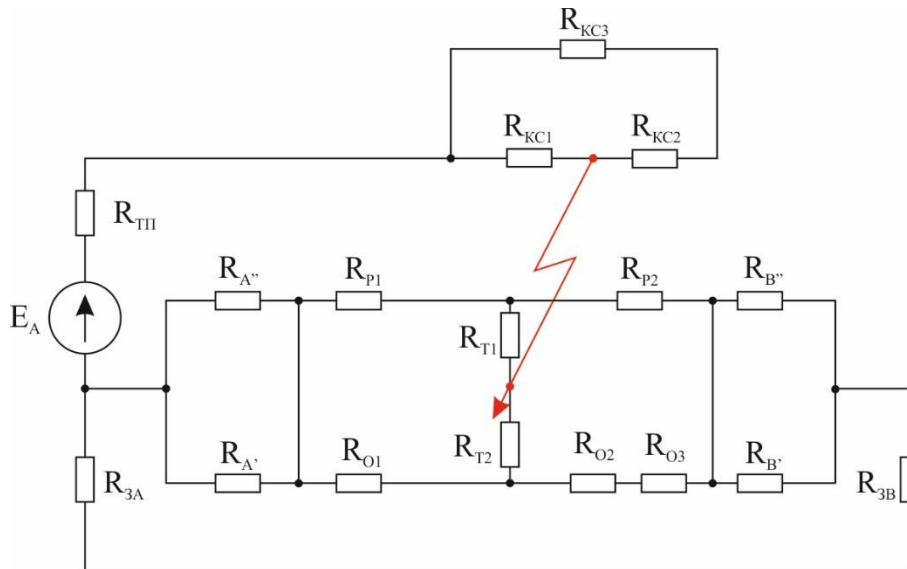


Рисунок 3.30 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ двухпутного участка при встречно-петлевой схеме питания

Расчёт для частного случая схемы одностороннего питания – схемы встречно-петлевого питания контактной сети (д), нашедшего широкое применение на двухпутных участках следует выполнять, используя рассуждения, приведённые для схем одностороннего питания.

После преобразования сопротивлений R_{KC1} , R_{KC2} и R_{KC3} в одно эквивалентное сопротивление получим:

$$R_{KC} = \frac{R_{KC1} \cdot (R_{KC2} + R_{KC3})}{R_{KC1} + R_{KC2} + R_{KC3}}.$$

Схема становится полностью аналогична схеме, рассмотренной ранее, в результате чего расчёты тока короткого замыкания необходимо для данного типа схем проводить по выражениям, полученным ранее, с учётом преобразования сопротивлений петли. Распределение токов по присоединениям можно определить, используя формулы разброса.

3.3 Программно-аппаратные средства моделирования

Практическое использование описанной методики расчёта токов короткого замыкания разработана с учётом возможности «ручного» выполнения расчёта токов в заданных точках. Приведённые в данном разделе выражения не требуют применения специальных вычислительных мощностей и могут быть использованы даже для неавтоматизированных расчётов. Однако, наличие большого числа точек, для которых необходим такой расчёт определяет целесообразность применения прикладных программ, позволяющих выполнять такие работы в полуавтоматическом и автоматическом режиме. К таковым программам следует отнести математические пакеты *Matlab*, *Mathcad*, *Maple*, а также различные табличные процессоры, реализующие функцию расчёта математических выражений

– Google Таблицы, LibreOffice Calc, WPS Office Spreadsheets и табличный процессор Excel, входящий в пакет Microsoft Office.

Рассмотрим создание расчётной программы в пакете *Mathcad*. Для реализации рассмотренной в данной главе методики расчёта удобно использовать названия переменных аналогичные тем, что указаны в тексте диссертации. Исходные данные, необходимые для определения условий расчёта задаются в первых строках исходного кода программы и могут меняться в зависимости от условий расчёта, определяемого характеристиками рассматриваемого участка. Переход точки короткого замыкания, осуществляется за счёт организации цикла по переменной, определяющей координату. В рассматриваемом случае в качестве точек короткого замыкания приняты опоры контактной сети, при этом шаг дискретизации принят равным расстоянию между опорами. Этот параметр не является жёстко заданным в модели, поэтому в случае необходимости можно детализировать расчёт уменьшив шаг. На Рисунке 3.31 приведён пример реализации программного кода в программе *Mathcad* 13, на рабочем поле пакета приведён также результат расчёта, представленный в виде матрицы. На Рисунке 3.32 приведена графическая интерпретация результата.

The screenshot shows the Mathcad interface with the following code and results:

```

Ro_okgt := 0.607   Ro_ks := 0.035   DI := 1.2   Lokgt := 5.04   L_a := 4.98
Ra := 0.238       Ro_r := 0.0154   Ro_t := 0.88   X := 0.06   I := 0
L01 := 0.06       Rkc1 := (L_a + L01 + X)Ro_ks
RO1 := L01-Ro_okgt   RO2 := Ro_okgt-DI   RO3 := (Lokgt - DI - L01)Ro_okgt
Rp1 := (DI/2 + L01)Ro_r   Rp2 := (Lokgt - DI/2 - L01)Ro_r

II := II ← "ТОК"
x ← 0
while x ≤ .6
  Rt1 ← Ro_t·x
  Rt2 ← (DI/2 - x)·Ro_t
  Rx1 ← RO3 + Rp2
  Rx2 ← Rx1
  Rx3 ← Rx2 + RO2
  Rx4 ← Rkc1 + Ra
  Rx5 ← (Rt1-Rt2)/(Rt1 + Rt2 + Rx3)
  x ← x + 1

```

The resulting matrix is:

0	"ТОК"
1	7329.196
2	6712.853
3	6307.111
4	6053.624
5	5921.177
6	5894.967
7	5972.18
8	6161.211
9	6484.061
10	6983.298

Рисунок 3.31 – Пример практической реализации метода расчёта

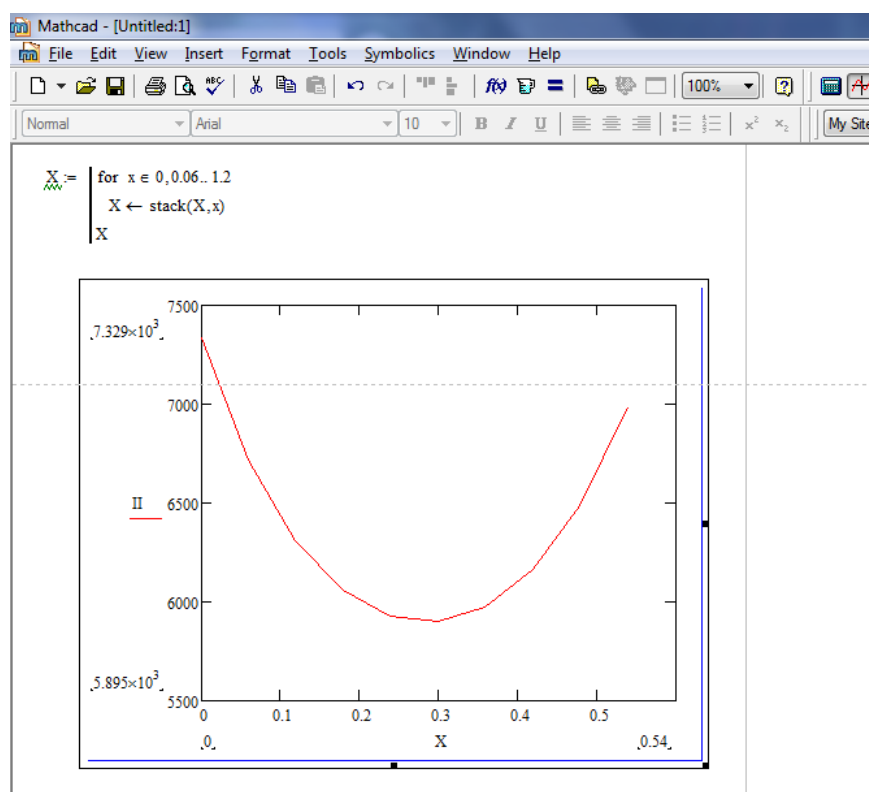


Рисунок 3.32 – Пример практической реализации метода расчёта

Другой вариант моделирования по приведенной методике – использование табличных процессоров. Такой подход не требует объявления переменных, и каждая формула должна быть последовательно рассчитана в ячейке программы. Целесообразно организовывать набор последовательных вычислений либо в виде строк, либо в виде столбцов. Это решение позволяет наглядно отследить значения всех составляющих, входящих в состав модели. Организация циклов в данном случае малоэффективна, так как необходимо иметь массив данных, объединяющий в себе результаты расчётов для различных точек. В работе для изменения координаты точки короткого замыкания данная величина задается в явном виде в начале расчётной строки. Необходимый шаг дискретизации определяется в зависимости от поставленной задачи. Результат моделирования токов короткого замыкания на табличном процессоре *Excel*, входящего в пакет программ *Microsoft Office 365* приведён на Рисунке 3.33.

Автосохранение Токи короткого в тресе - ОКТЯБРЬ 2021 3.xlsx

Файл Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Справка

Вставить Вырезать Копировать Формат по образцу

Буфер обмена Шрифт: Calibri, 11, Ж К Ч, А, А

Выравнивание: Переносить текст Объединить и поместить в центре

Число: Общий, % 000 0,00

Стили: Обычный, Плохой, Условное форматирование Форматировать как таблицу

А36

	A	B	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AC	AD
			Ra	Rkc1	Ro1	Ro2	Ro3	Rp1	Rp2	Rt1	Rt2	Rx1	Rx2	Rx3	Rx4	Rx5	Rx6	Rx7	Rx8	Rx9	Rx10	R	Ikз	
3	Наименование	Значение	0	0,238	0,18	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0	0,528	2,362	2,362	3,09	0,41	0	0	0,451	0,414	0,036	0,461	0,45	7,367
4	Удельное сопротивление рельсов	0,0154	0,06	0,238	0,18	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,053	0,475	2,362	2,362	3,09	0,42	0,007	0,045	0,406	0,423	0,082	0,416	0,49	6,716
5	Удельное сопротивление контактной сети	0,035	0,12	0,238	0,18	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,106	0,422	2,362	2,362	3,09	0,42	0,012	0,09	0,361	0,431	0,127	0,371	0,53	6,284
6			0,18	0,238	0,18	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,158	0,37	2,362	2,362	3,09	0,42	0,016	0,135	0,316	0,437	0,172	0,326	0,55	6,01
7	Удельное сопротивление троса заземлени	0,88	0,24	0,238	0,18	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,211	0,317	2,362	2,362	3,09	0,42	0,018	0,18	0,271	0,441	0,217	0,281	0,56	5,857
8	Сопротивление ТП1	0,163	0,3	0,238	0,19	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,264	0,264	2,362	2,362	3,09	0,42	0,019	0,225	0,225	0,444	0,262	0,236	0,57	5,81
9	Сопротивление ТП2	0,163	0,36	0,238	0,19	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,317	0,211	2,362	2,362	3,09	0,43	0,018	0,271	0,18	0,445	0,307	0,191	0,56	5,863
10	Удельное сопротивление ОКГТ	0,607	0,42	0,238	0,19	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,37	0,158	2,362	2,362	3,09	0,43	0,016	0,316	0,135	0,445	0,352	0,145	0,55	6,022
11	Сопротивление заземления ТП	0,5	0,48	0,238	0,19	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,422	0,106	2,362	2,362	3,09	0,43	0,012	0,361	0,09	0,443	0,397	0,1	0,52	6,305
12	Длина от левого до правого заземлителя О	5,04	0,54	0,238	0,2	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,475	0,053	2,362	2,362	3,09	0,43	0,007	0,406	0,045	0,44	0,442	0,055	0,49	6,746
13	Длина участка (L)	20,1	0,6	0,238	0,2	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,528	2E-16	2,362	2,362	3,09	0,44	3E-17	0,451	2E-16	0,435	0,487	0,01	0,45	7,413
14	Расстояние до левого заземлителя ОКГТ (la	4,98E+00	0,66	0,238	0,2	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,475	0,053	2,362	1,35	6,711	4,38	6,711	0,052	1,117	0,009	0,043	1,153	0,5	6,641
15	Расстояние до левого заземлителя ТГЗ сле	6,00E-02	0,72	0,238	0,2	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,422	0,106	2,362	1,281	7,163	4,15	7,163	0,103	1,074	0,015	0,086	1,11	0,54	6,071
16	Шаг между опорами	0,06	0,78	0,238	0,2	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,37	0,158	2,362	1,212	7,745	3,93	7,745	0,152	1,03	0,02	0,129	1,067	0,59	5,639
17	Длина ТГЗ	1,2	0,84	0,238	0,21	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,317	0,211	2,362	1,143	8,521	3,71	8,521	0,2	0,987	0,023	0,173	1,024	0,62	5,307
18			0,9	0,238	0,21	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,264	0,264	2,362	1,074	9,607	3,48	9,607	0,245	0,944	0,024	0,216	0,981	0,65	5,05
19			0,96	0,238	0,21	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,211	0,317	2,362	1,005	11,24	3,26	11,24	0,289	0,901	0,023	0,259	0,937	0,68	4,853
20		0,0528	1,02	0,238	0,21	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,158	0,37	2,362	0,936	13,95	3,03	13,95	0,329	0,858	0,02	0,302	0,894	0,7	4,704
21			1,08	0,238	0,21	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,106	0,422	2,362	0,867	19,38	2,81	19,38	0,367	0,815	0,015	0,345	0,851	0,72	4,595
22			1,14	0,238	0,22	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	0,053	0,475	2,362	0,797	35,67	2,59	35,67	0,401	0,772	0,009	0,388	0,808	0,73	4,523
23			1,2	0,238	0,22	0,04	0,73	2,29	0,01	0,067	9E-41	0,528	2,362	0,728	2E+40	2,36	7E+39	0,432	0,728	5E-41	0,432	0,765	0,74	4,483
24																								
25																								
26																								
27																								
28																								

Рисунок 3.33 – Пример практической реализации метода расчёта

Определение токов КЗ возможно выполнить альтернативным способом – путём моделирования электрических схем, показанных на Рисунках 3.1, 3.2. Моделирование возможно выполнять на специализированном программном обеспечении, например *Matlab Simulink*, *Multisim*, *Electronic Workbench*.

Для расчёта применим прикладную программу *Matlab Simulink*, при помощи которой выполним моделирование и расчёт токов короткого замыкания. Будем выполнять моделирование режима работы однопутного участка с протяжённостью 20 км, на участке от тяговой подстанции до поста секционирования.

Положим, что пост секционирования расположен на расстоянии 10 км от левой подстанции. На участке применяется встречно-консольная схема питания контактной сети. Рельсовый путь выполнен рельсами типа Р65, контактная сеть М120+2МФ100, волоконно-оптический кабель ОКГТС–1–1, ТГЗ – ПБСМ2–70.

Расчёт выполнен со следующими исходными данными:

длина участка ТГЗ – 1200 м,

расстояние от левого до правого заземлителя ОКГТ – 2,5 км,

сопротивление контактной сети – $\rho_{\text{кc}} = 0,0567$ Ом/км,

сопротивление троса заземления – $\rho_{\text{тгз}} = 0,88$ Ом/км.

Модель системы двухуровневого заземления представлена на Рисунке 3.34.

Произведем моделирование на представленной модели и сравним результат с расчётным, выполненным по приведённым выше выражениям.

На диаграмме, показанной на Рисунке 3.35 представлены результаты расчёта значений токов КЗ, полученных на математической модели. На диаграмме (Рисунок 3.36) показана относительная погрешность расчёта, определённая в результате сравнения расчётных данных с результатами модельного эксперимента на программе *Matlab Simulink*. Полученные результаты свидетельствуют о корректности составленной математической расчётной модели [77].

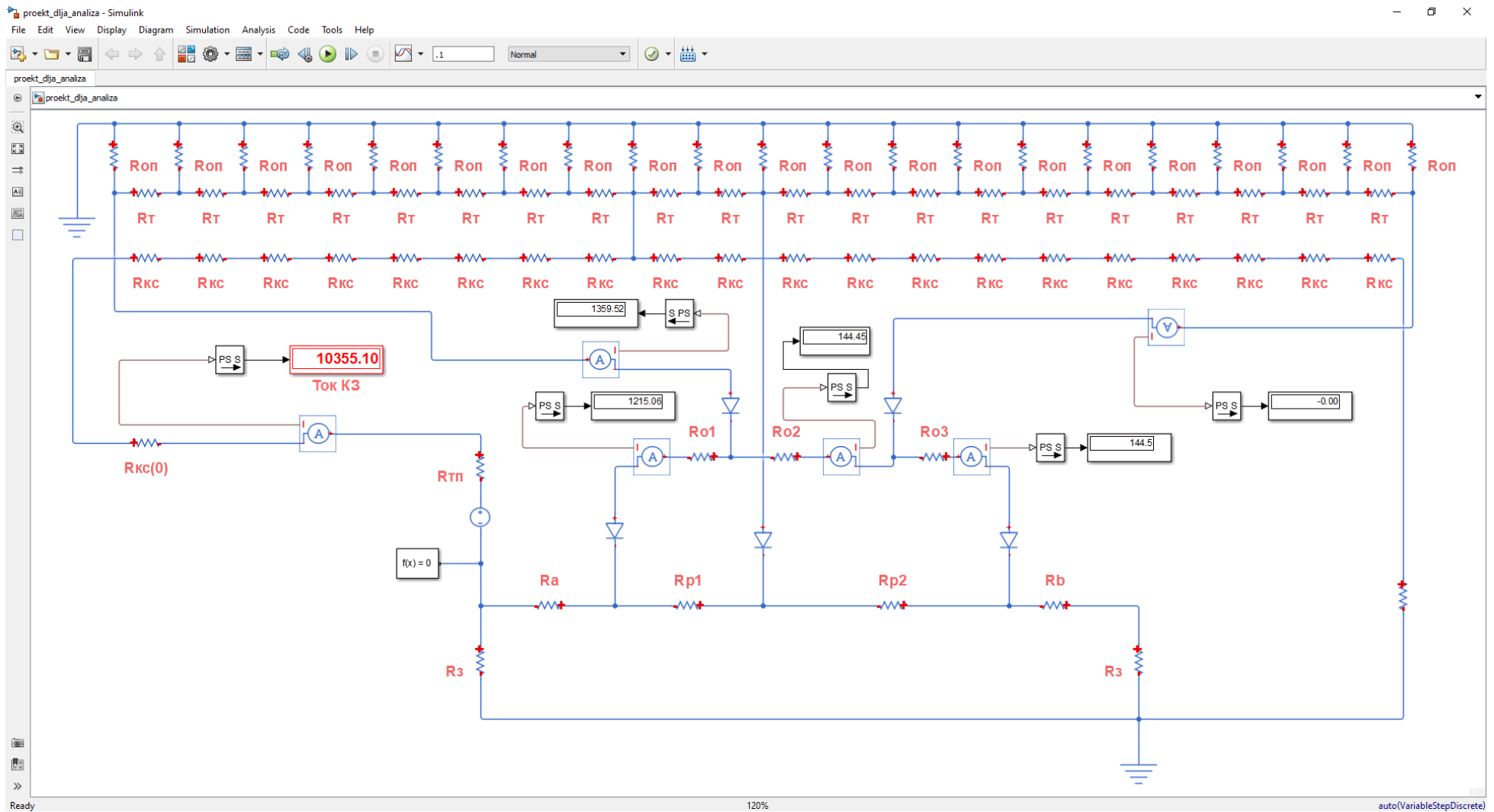


Рисунок 3.34 – Двухуровневая модель заземления в программе *Matlab Simulink*

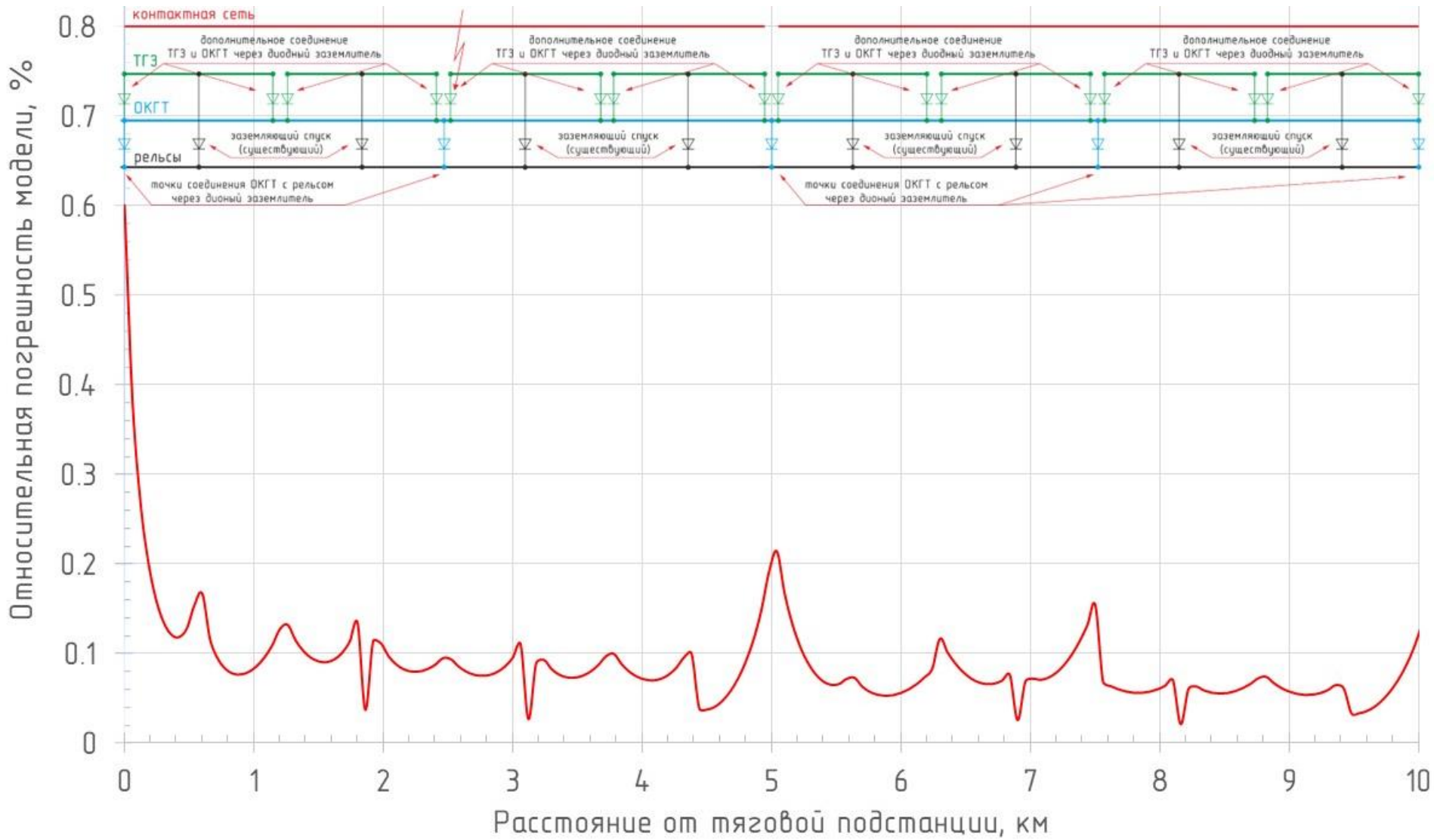


Рисунок 3.36 – Результаты сравнения токов КЗ, полученных на математической модели и в результате моделирования

3.4 Исследования режимов короткого замыкания в межподстанционной зоне

Используя результаты исследования, приведённые ранее в настоящей работе, проведём расчёт токов, возникающих при коротком замыкании в тяговой сети постоянного тока. При расчёте будем полагать, что короткое замыкание «глухое», и переходным сопротивлением в месте аварии можно пренебречь. В противном случае, при необходимости, можно найти ток короткого замыкания добавив к эквивалентному сопротивлению в расчётной формуле тока КЗ значение переходного сопротивления, в том числе и в случае решения нелинейной задачи.

Исследуем токи КЗ для двух характерных случаев – традиционной схемы заземления опор контактной сети и для предлагаемой, двухуровневой схемы заземления. Для расчёта токов КЗ в традиционной схеме заземления также применим ранее изложенную методику, положив значение удельного сопротивления волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ равным бесконечности, что соответствует отсутствию данного проводника в схеме.

При анализе токов короткого замыкания, возникающих при использовании двухуровневой схемы заземления опор контактной сети, рассмотрим варианты, соответствующие случаям, когда на участке завешен волоконно-оптический кабель с весьма большим и весьма малым удельным сопротивлением постоянному току. В качестве таких образцов принят кабель типа ОКГТС–1–24, с удельным сопротивлением 0,254 Ом/км и кабель ОКГТ–1–1, с удельным сопротивлением 0,607 Ом/км.

При расчёте принято, что на участке завешена контактная подвеска типа М120+2МФ100, с удельным сопротивлением 0,0567 Ом/км и рассмотрен вариант её усиления, в виде М120+2МФ100+2А185, с удельным сопротивлением 0,035 Ом/км. В качестве троса группового заземления также рассмотрено использование двух типов ТГЗ, это ПБСМ2–70, с удельным сопротивлением 0,88 Ом/км и ТГЗ типа АС–95, с удельным сопротивлением 0,306 Ом/км. Тип рельсов принят Р65, с удельным сопротивлением двух ниток 0,0154 Ом/км.

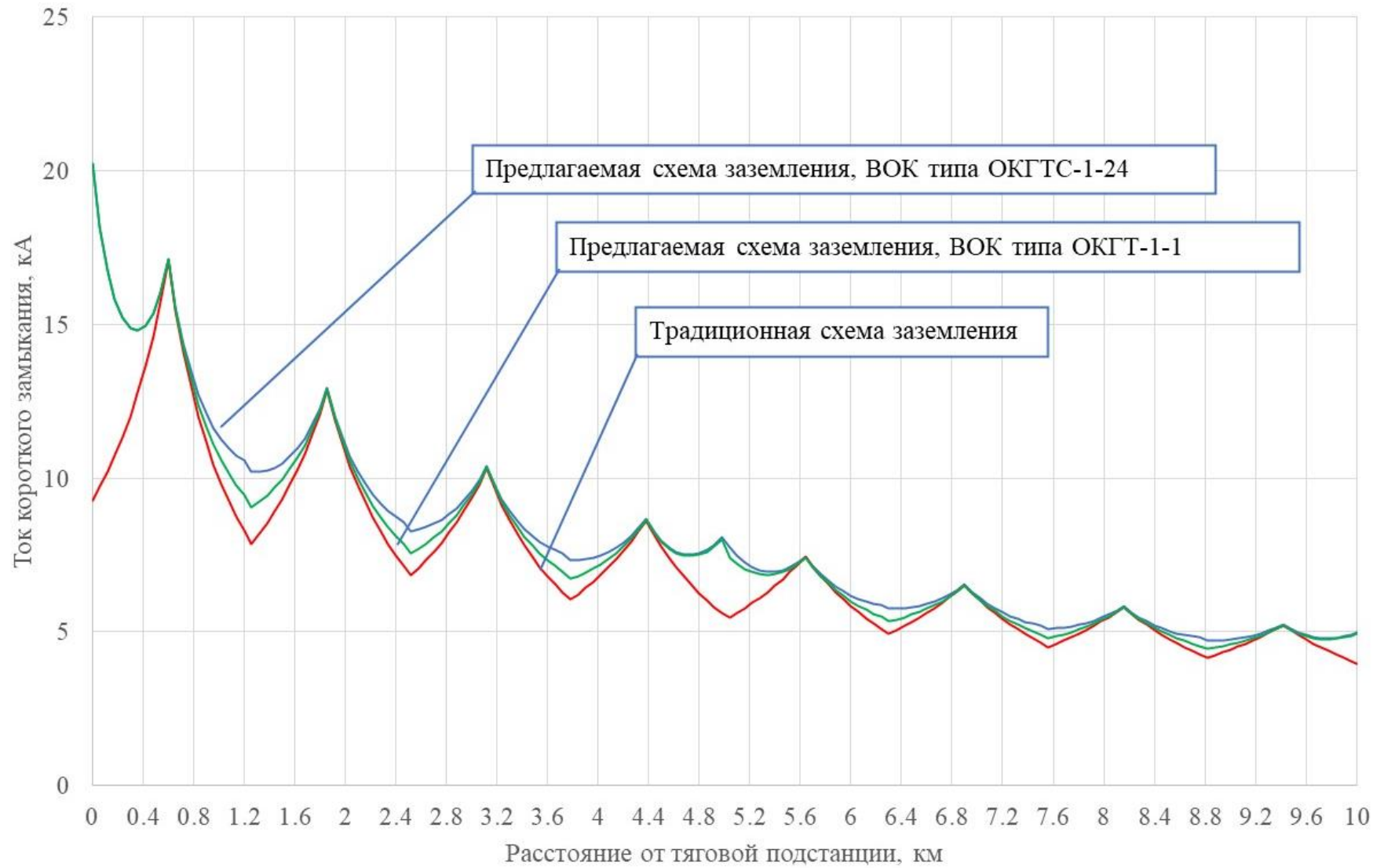


Рисунок 3.37 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100, трос группового заземления АС–95, одностороннее питание

На Рисунке 3.37 и на Рисунках А.1–А.7 (Приложении А) приведены результаты расчётов токов короткого замыкания. Наблюдается увеличение тока КЗ на концах участка группового заземления опор, например точка с координатой 1,2 км. Также значительно увеличился ток в конце зоны, что объясняется наличием дополнительного места соединения ОКГТ с ТГЗ и рельсом в данной точке. Хорошо видно, что для ОКГТ с меньшим удельным сопротивлением увеличение тока короткого замыкания выше.

3.5 Выводы по главе

Рассмотрена задача определения токов КЗ в схеме, содержащей несколько нелинейных элементов – диодов и значительное количество последовательно-параллельно соединённых элементов. В главе сформулирован подход, позволяющий осуществить расчёт токов КЗ для различных вариантов организации питания участка железной дороги постоянного тока.

Получен математический аппарат, позволяющий, с достаточной для инженерных расчётов точностью, определить токи короткого замыкания в сети постоянного тока электрифицированных железных дорог в случае использования двухуровневой схемы заземления опор контактной сети.

Выполнены расчёты токов короткого замыкания для различных вариантов исполнения тяговой сети на рассматриваемой межподстанционной зоне.

4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВОЛС

4.1 Общие положения

В данной главе проведён комплексный анализ предлагаемой в диссертационной работе двухуровневой системы группового заземления опор. Основная задача, которая была поставлена в данной работе – повышение чувствительности релейной защиты за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания. Для оценки эффективности предлагаемого технического решения предполагается выполнить оценку токов короткого замыкания при реализации предлагаемой системы, произвести их сравнение и сделать вывод о величине изменения тока.

Ввиду особенностей конструкции ВОЛС типа ОКГТ для обеспечения нормального функционирования линии связи, выполненной кабелем ОКГТ необходимо выполнить оценку влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его характеристики и срок службы, разработать алгоритм определения токов, протекающих в ОКГТ в аварийном режиме.

Использование системы группового заземления имеет своей важнейшей задачей защиту людей, находящихся вблизи опор контактной сети, и имеющих потенциальную возможность прикоснуться к опоре, через которую стекает часть тока короткого замыкания. При анализе эффективности применения предлагаемой системы заземления опор будет проведён сравнительный анализ величины напряжения прикосновения для существующего и предлагаемого способа организации группового заземления.

В главе выполнен расчёт капитальных затрат на реализацию предлагаемой системы, без учёта капиталовложений на сооружение волоконно-оптических линий связи.

Результаты исследований опубликованы [97–99, 112].

4.2 Оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию

4.2.1 Методика расчёта токов, протекающих в металлической оболочке оптического кабеля, вмонтированного в грозозащитный трос

Анализ условий работы оптических волокон в структуре металлического волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ показывает, что их работа сопряжена с рядом деструктивно воздействующих факторов, минимизация которых позволит значительно увеличить срок безаварийной работы волоконно-оптического кабеля.

Основными деструктивными факторами являются активные теплофизические процессы, возникающие при коротких замыканиях и особенно при плавке гололёда, воздействующие значительными по величине токами и, в определённой степени, электрофизические процессы в структуре материалов, составляющих волоконно-оптический кабель (ВОК).

Теплофизические процессы в структуре модуля «грозозащитный трос – ВОК», при определённых условиях, являются достаточно опасными и могут привести не только к изменению структуры стекловолокна, но и к полному термическому разрушению волоконно-оптического кабеля. Поэтому этот фактор, при определённых условиях граничный, и деструктивный для ВОК будет исследован достаточно подробно с формированием физической модели и условий максимально приближённых к реальным.

Как известно, максимально допустимая температура нагрева ОКГТ при воздействии тока плавки гололёда не должна превышать указанного изготовителем ОКГТ [73] значения 85 °С. При увеличении температуры свыше данного значения происходит изменение структуры отражающего покрытия, нанесённого на внутренние стенки волоконно-оптической трубки, что в свою очередь приводит к затуханию информационного сигнала и выходу из строя линии связи. Таким образом, расчёт тепловых процессов, возникающих в кабеле ОКГТ при протекании

по нему токов большой величины, является достаточно важной и трудоёмкой задачей.

Нагрев структуры кабеля ОКГТ и, в частности, её металлических элементов, происходит вследствие протекания в данных проводниках электрического тока и описывается законом Джоуля – Ленца. Как известно из курса электротехники, при протекании электрического тока по проводнику в последнем возникают потери мощности, которые проявляются в виде выделения тепловой энергии в структуре проводника. Данные потери в самом общем случае можно выразить следующим выражением:

$$P = \int_V j^2 \rho dV,$$

где j – плотность тока;

ρ – удельное электрическое сопротивление проводника;

V – объём проводника.

Для анализа теплофизических процессов в структуре ОКГТ в качестве основного деструктивно влияющего фактора будем полагать ток короткого замыкания, ответвляющийся в ОКГТ при авариях. Для расчёта величины тока, протекающего в ОКГТ в качестве исходных данных, возьмём результаты расчёта тока КЗ, полученные в Главе 3 диссертационной работы. Для анализа термической стойкости ОКГТ рассмотрим случай консольного питания контактной сети, и соответствующую ему эквивалентную схему замещения. Для определения доли общего тока КЗ, ответвляющейся в ОКГТ на первом этапе используя схему, показанную на Рисунке 3.11 найдём доли тока КЗ, растекающиеся по ВОЛС влево и вправо, по сопротивлениям R_{T1} и R_{T2} соответственно:

$$I_{T1} = I_{K3} \cdot \frac{R_{11} + R_{T2}}{R_{11} + R_{12} + R_{T1} + R_{T2}}. \quad (4.1)$$

$$I_{T2} = I_{K3} \cdot \frac{R_{12} + R_{T1}}{R_{11} + R_{12} + R_{T1} + R_{T2}}. \quad (4.2)$$

Для дальнейшей работы используем схему замещения, показанную на Рисунке 3.7, указав на ней направления токов в элементах схемы, Рисунок 4.1.

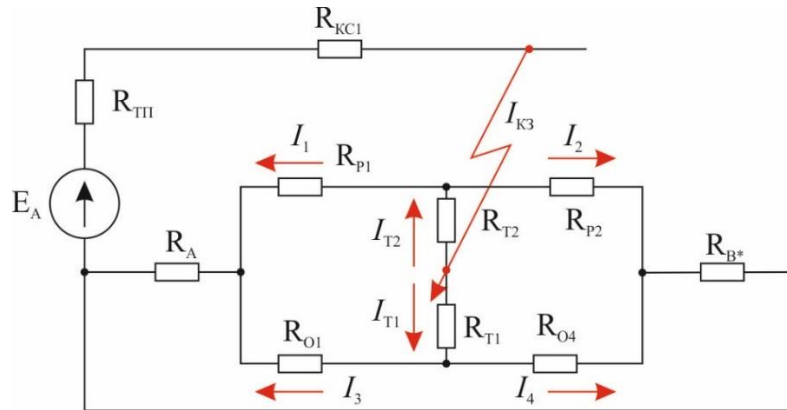


Рисунок 4.1 – К расчёту токов в ОКГТ на однопутном участке при одностороннем питании контактной сети

Для двух независимых контуров, в которые включено сопротивление троса группового заземления опор можно составить уравнения:

$$\begin{cases} I_3 \cdot R_{O1} - I_1 \cdot R_{P1} - I_{T2} \cdot R_{T2} + I_{T1} \cdot R_{T1} = 0 \\ I_2 \cdot R_{P2} - I_4 \cdot R_{O4} + I_{T2} \cdot R_{T2} - I_{T1} \cdot R_{T1} = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

После преобразования:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I_{T1} \cdot R_{T1} - I_{T2} \cdot R_{T2} + I_3 \cdot R_{O1}}{R_{P1}} \\ I_2 = \frac{I_{T1} \cdot R_{T1} - I_{T2} \cdot R_{T2} + I_4 \cdot R_{O4}}{R_{P2}} \end{cases} \quad (4.4)$$

С учётом того, что

$$I_1 + I_2 = I_{T2}. \quad (4.5)$$

$$I_3 + I_4 = I_{T1}.$$

Перепишем последнюю систему выражений:

$$I_{T2} = \frac{I_{T1} \cdot R_{T1} - I_{T2} \cdot R_{T2} + I_3 \cdot R_{O1}}{R_{P1}} + \frac{I_{T1} \cdot R_{T1} - I_{T2} \cdot R_{T2} + (I_{T1} - I_3) \cdot R_{O4}}{R_{P2}}. \quad (4.6)$$

Решив данное выражение относительно искомой величины, получим:

$$I_{O1} = I_3 = \frac{(I_{T1} \cdot R_{T1} - I_{T2} \cdot R_{T2}) \cdot (R_{P1} + R_{P2}) + I_{T1} \cdot R_{O4} \cdot R_{P1} - I_{T2} \cdot R_{P1} \cdot R_{P2}}{R_{O4} \cdot R_{P1} - R_{O1} \cdot R_{P2}}. \quad (4.7)$$

Ток на втором участке ОКГТ можно определить, используя выражение:

$$I_{O4} = I_4 = I_{T1} - I_3. \quad (4.8)$$

Пользуясь аналогичными рассуждениями, получим выражения для расчёта доли тока в ОКГТ при проходе заземляющего спуска (Рисунок 3.11). При переходе точки КЗ через заземляющий спуск расчётное выражение принимает вид:

$$I_{T3} = I_{K3} \cdot \frac{R_{11} + R_{T2}}{R_{11} + R_{12} + R_{T3} + R_{T2}}. \quad (4.9)$$

$$I_{T2} = I_{K3} \cdot \frac{R_{12} + R_{T3}}{R_{11} + R_{12} + R_{T3} + R_{T2}}. \quad (4.10)$$

$$I_{O3} = I_3 = \frac{(I_{T3} \cdot R_{T3} - I_{T2} \cdot R_{T2}) \cdot (R_{P1} + R_{P2}) + I_{T3} \cdot R_{O3} \cdot R_{P1} - I_{T2} \cdot R_{P1} \cdot R_{P2}}{R_{O3} \cdot R_{P1} - R_{P2} \cdot R_{O1} - R_{P2} \cdot R_{O2}}. \quad (4.11)$$

$$I_{O2} = I_{O1} = I_4 = I_{T1} - I_3. \quad (4.12)$$

Рассмотрим методику расчёта тока в ОКГТ при использовании схем двустороннего питания. Рассмотрим схему замещения, показанную на Рисунке 3.19, ранее полученную в Главе 3. Доли токов КЗ, подтекающие от тяговых подстанций «А» и «В» можно определить по выражениям:

$$I_{K3(A)} = I_{K3} \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}}. \quad (4.13)$$

$$I_{K3(B)} = I_{K3} \cdot \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}}. \quad (4.14)$$

Для дальнейшей работы рассмотрим схему замещения, показанную на Рисунке 3.13. Эта схема справедлива для случая, когда точка КЗ расположена левее заземляющего спуска. Расставим токи во всех ветвях схемы и запишем уравнения, используя законы Кирхгофа. В процессе работы составляющие тока короткого замыкания, протекающего через тяговые подстанции, будем считать известными. Схема представлена на Рисунке 4.2.

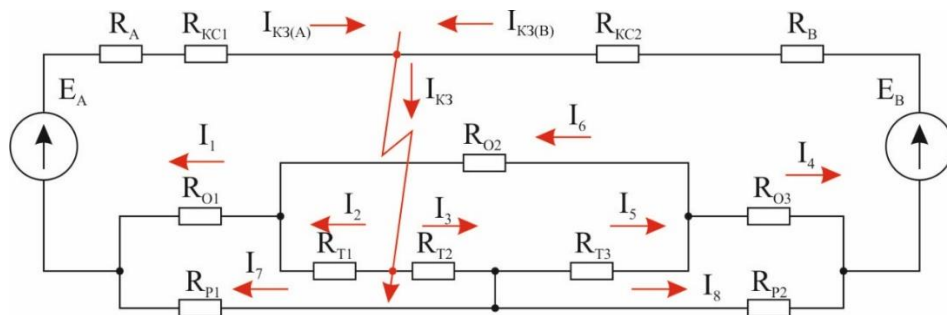


Рисунок 4.2 – К расчёту токов в ОКГТ на однопутном участке при двустороннем питании контактной сети

Для представленной схемы справедливы соотношения:

$$I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) + I_2 \cdot R_{\text{T1}} + I_1 \cdot R_{\text{О1}} = E_{\text{А}}. \quad (4.15)$$

$$I_3 \cdot R_{\text{T2}} + I_7 \cdot R_{\text{P1}} - I_1 \cdot R_{\text{О1}} - I_2 \cdot R_{\text{T1}} = 0. \quad (4.16)$$

Из 4.15 получим:

$$I_2 = \frac{E_{\text{А}} - I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) - I_1 \cdot R_{\text{О1}}}{R_{\text{T1}}}. \quad (4.17)$$

Учитывая, что

$$I_3 = I_{\text{КЗ}} - I_2 = \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot R_{\text{T1}} - E_{\text{А}} + I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) + I_1 \cdot R_{\text{О1}}}{R_{\text{T1}}}. \quad (4.18)$$

$$I_7 = I_{\text{КЗ(А)}} - I_1. \quad (4.19)$$

Сложим 4.15 и 4.16:

$$I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) + I_3 \cdot R_{\text{T2}} + I_7 \cdot R_{\text{P1}} = E_{\text{А}}. \quad (4.20)$$

Подставим в полученное выражение соотношения 4.18 и 4.19:

$$I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) + \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot R_{\text{T1}} - E_{\text{А}} + I_{\text{КЗ(А)}} \cdot (R_{\text{А}} + R_{\text{КС1}}) + I_1 \cdot R_{\text{О1}}}{R_{\text{T1}}} R_{\text{T2}} + (I_{\text{КЗ(А)}} - I_1) \cdot R_{\text{P1}} = E_{\text{А}}.$$

После преобразования, с учётом того, что $I_{\text{О1}} = I_1$.

$$I_{O1} = \frac{I_{K3} \cdot R_{T1} \cdot R_{T2} + I_{K3(A)} \cdot \left[(R_A + R_{KC1} + R_{P1}) \cdot R_{T1} + (R_A + R_{KC1}) \cdot R_{T2} \right] - E_A \cdot (R_{T1} + R_{T2})}{R_{P1} \cdot R_{T1} - R_{O1} \cdot R_{T2}}. \quad (4.21)$$

Ток I_4 определим из соотношения:

$$I_4 = I_{O3} = I_{K3(B)} - I_8.$$

Учитывая, выражение

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_8 \cdot R_{P2} + I_7 \cdot R_{P1} = E_A - E_B = 0.$$

$$I_8 = \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + (I_{K3(A)} - I_1) \cdot R_{P1}}{R_{P2}}. \quad (4.22)$$

$$I_{O3} = I_{K3(B)} - \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + (I_{K3(A)} - I_{O1}) \cdot R_{P1}}{R_{P2}}. \quad (4.23)$$

Для расчёта тока в ОКГТ на участке 2 составим уравнение:

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_4 \cdot R_{O3} + I_1 \cdot R_{O1} + I_6 \cdot R_{O2} = E_A - E_B = 0.$$

Из уравнения определим искомый ток:

$$I_{O2} = I_6 = \frac{I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_4 \cdot R_{O3} - I_1 \cdot R_{O1}}{R_{O2}}. \quad (4.24)$$

При перемещении точки КЗ правее заземляющего спуска схема замещения будет соответствовать случаю, показанному на Рисунке 4.3.

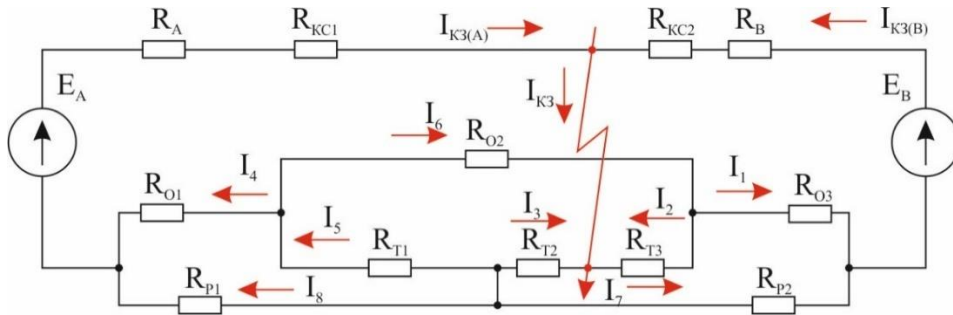


Рисунок 4.3 – К расчёту токов в ОКГТ на однопутном участке при двустороннем питании контактной сети

Сравнивая Рисунки 4.2 и 4.3, можно заключить, что они зеркально повторяют друг друга. С учётом этого:

$$I_{O3} = \frac{I_{K3} \cdot R_{T3} \cdot R_{T2} + I_{K3(B)} \cdot \left[(R_B + R_{KC2} + R_{P2}) \cdot R_{T3} + (R_B + R_{KC2}) \cdot R_{T2} \right] - E_B \cdot (R_{T3} + R_{T2})}{R_{P2} \cdot R_{T3} - R_{O3} \cdot R_{T2}}. \quad (4.25)$$

$$I_{O1} = I_{K3(A)} - \frac{I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + (I_{K3(B)} - I_{O3}) \cdot R_{P2}}{R_{P1}}. \quad (4.26)$$

$$I_{O2} = I_6 = \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + I_{O1} \cdot R_{O1} - I_{O3} \cdot R_{O3}}{R_{O2}}. \quad (4.27)$$

4.2.2 Анализ процесса нагрева металлической оболочки ОКГТ

В предыдущем разделе получены соотношения, позволяющие рассчитать токи, протекающие в волоконно-оптической линии связи при коротком замыкании. Эти токи, протекая по ОКГТ будут вызывать его нагревание, что может негативно сказаться на его технических характеристиках. Данный процесс необходимо

исследовать как нестационарный, и рассматривать во времени. Для всех типов ОКГТ, производимых в настоящее время как на территории нашей страны, так и за рубежом в качестве паспортных данных указываются в том числе две величины – это предельное значение тока, протекающего по кабелю в течение одной секунды, и максимальная величина теплового импульса, определяемая по выражению:

$$\int_0^{\Delta t} i^2 dt = \Delta t \cdot I^2. \quad (4.28)$$

Сравнивая заданное в паспорте кабеля значение термической стойкости – максимально допустимого значения теплового импульса ОКГТ с расчётной величиной можно сделать вывод о том, возможно ли использовать выбранный кабель на конкретной межподстанционной зоне в качестве элемента системы двухуровневого заземления опор контактной сети. Однако, значение теплового импульса приводится для ОКГТ из расчёта, что температура кабеля при КЗ может достигать значений 200 °С. Для решаемой в диссертационной работе задачи создания двухуровневой системы заземления опор контактной сети такой подход недопустим. Вероятность возникновения КЗ в пределах межподстанционной зоны значительно выше, чем на ЛЭП, поэтому аварийные ситуации могут происходить значительно чаще, особенно на участках с интенсивным движением. Необходим алгоритм проверки термической стойкости ОКГТ для случая, когда температура оптического модуля не превысит 85 °С [73].

Для изучения процесса нагрева структуры ОКГТ токами короткого замыкания возможно использование ряда программных продуктов, моделирующих процесс нагрева неоднородных тел. В качестве одной из таких программ в диссертационной работе предлагается программа «*Elcut Professional 6.3*», разработчиком которой является компания «Тор», город Санкт-Петербург. Программа позволяет в числе многих других задач решать задачи нестационарной теплопередачи, что отвечает требованиям проводимого исследования. В качестве объекта исследования в диссертационной работе был принят оптоволоконный

кабель ОКГТ–1–24(16 G.652/8 G.655) –13,3/94 со следующими характеристиками [40]:

- диаметр центрального силового элемента – 2,1 мм,
- диаметр проволок из алюминиевого сплава – 2,9 мм,
- диаметр проволок из стального сплава – 2,7 мм,
- сечение стали – 73,88 мм²,
- сечение алюминиевого сплава – 26,42 мм².

Модель кабеля, созданная в программе «*Elcut Professional 6.3*» представлена на Рисунке 4.4.

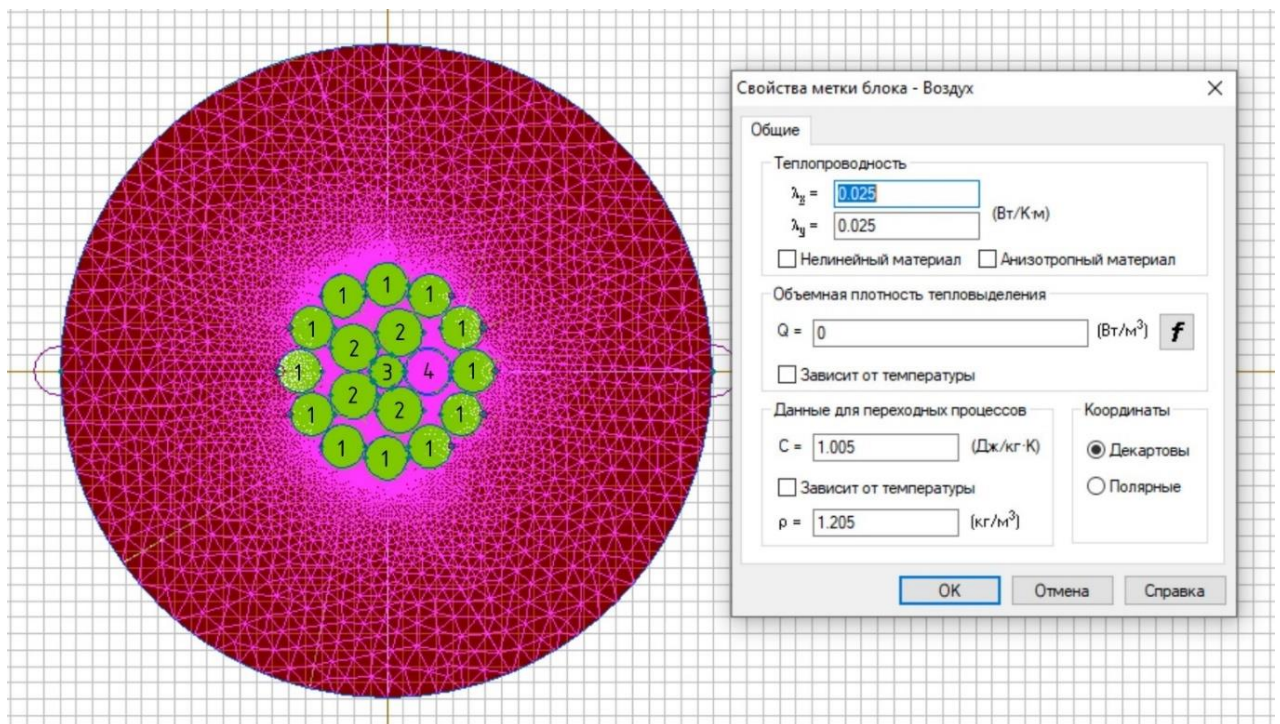


Рисунок 4.4 – Построение расчётной модели кабеля ОКГТ в программе «*Elcut Professional 6.3*»

Модель состоит из трёх сред – воздух, сталь и алюминий. Для каждой из сред были заданы параметры теплопроводности, теплоёмкости и плотности соответствующего материала. На Рисунке 4.4 малиновым цветом выделена зона, соответствующая воздуху. Цифрой 1 обозначены проволоки второго повива, выполненные из стали. Цифрой 2 обозначены проволоки первого повива,

выполненные из алюминия, цифрой 3 обозначен центральный силовой модуль, оптический модуль обозначен цифрой 4. Технические характеристики материалов [85], используемые в модели приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики материалов

Наименование	Теплопроводность, Вт/К·м	Теплоёмкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ³
Сталь	47	500	7870
Алюминий	204	920	2700
Воздух	0,025	1,005	1,205

Как было сказано ранее, нагрев кабеля осуществляется за счёт тепла, выделяемого стальными и алюминиевыми проволоками, из которых состоит ОКГТ. В области, занятой воздухом, источники тепла отсутствуют. Учитывая, что все металлические элементы кабеля представляют собой активные сопротивления, соединённые параллельно, выполним расчёт токов во всех проводниках кабеля. Примем удельное сопротивление стальных элементов равным $\rho_{ст} = 0,11$ Ом·мм²/м, алюминиевых элементов равным $\rho_{ал} = 0,027$ Ом·мм²/м. Таким образом, доля тока, протекающая в алюминиевой и стальной частях, будет определяться выражениями:

$$\frac{I_{AL}}{I} = \frac{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ}}{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ} + \rho_{AL}/S_{AL}} = \frac{0,11/73,88}{0,11/73,88 + 0,027/26,42} = 0,593.$$

$$\frac{I_{СТАЛИ}}{I} = \frac{\rho_{AL}/S_{AL}}{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ} + \rho_{AL}/S_{AL}} = \frac{0,027/26,42}{0,11/73,88 + 0,027/26,42} = 0,407.$$

Ток, протекающий в одной алюминиевой проволоке:

$$I_{AL} = \frac{I \cdot 0,593}{n} = \frac{I \cdot 0,593}{4} = 0,148 \cdot I.$$

Ток, протекающий в центральном стальном модуле:

$$I_{CS} = 0,407 \cdot I \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / S_{СТАЛИ} = 0,407 \cdot I \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / 73,88 = 0,019 \cdot I.$$

Ток, протекающий во втором стальном повиве:

$$I_S = I \cdot \frac{0,407}{m} \cdot \left[1 - \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / S_{СТАЛИ}\right] = I \cdot \frac{0,407}{12} \cdot \left[1 - \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / 73,88\right] = 0,0323 \cdot I.$$

Согласно паспорту кабеля [40], допустимый ток в пределах 1 секунды для данного кабеля составляет 8200 А. С учётом этого определим объёмную плотность тепловыделения для каждого элемента кабеля ОКГТ:

$$Q = \frac{I^2 R}{V} = \frac{I^2}{\pi \cdot R^2 l} \cdot \frac{\rho}{\pi \cdot R^2}.$$

- Для алюминиевых проволок первого повива:

$$Q_{AL} = \frac{I_{AL}^2}{\pi \cdot R_{AL}^2} \cdot \frac{\rho_{AL}}{\pi \cdot R_{AL}^2} = \frac{(0,148 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,45 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,027}{\pi \cdot 1,45^2} = 9,15 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

- Для центрального стального силового модуля:

$$Q_{CS} = \frac{I_{CS}^2}{\pi \cdot R_{CS}^2} \cdot \frac{\rho_{СТАЛИ}}{\pi \cdot R_{CS}^2} = \frac{(0,019 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,05 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,11}{\pi \cdot 1,05^2} = 2,24 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

- Для стальных проволок второго повива:

$$Q_{CS} = \frac{I_S^2}{\pi \cdot R_S^2} \cdot \frac{\rho_{СТАЛИ}}{\pi \cdot R_S^2} = \frac{(0,0323 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,35 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,11}{\pi \cdot 1,35^2} = 2,33 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

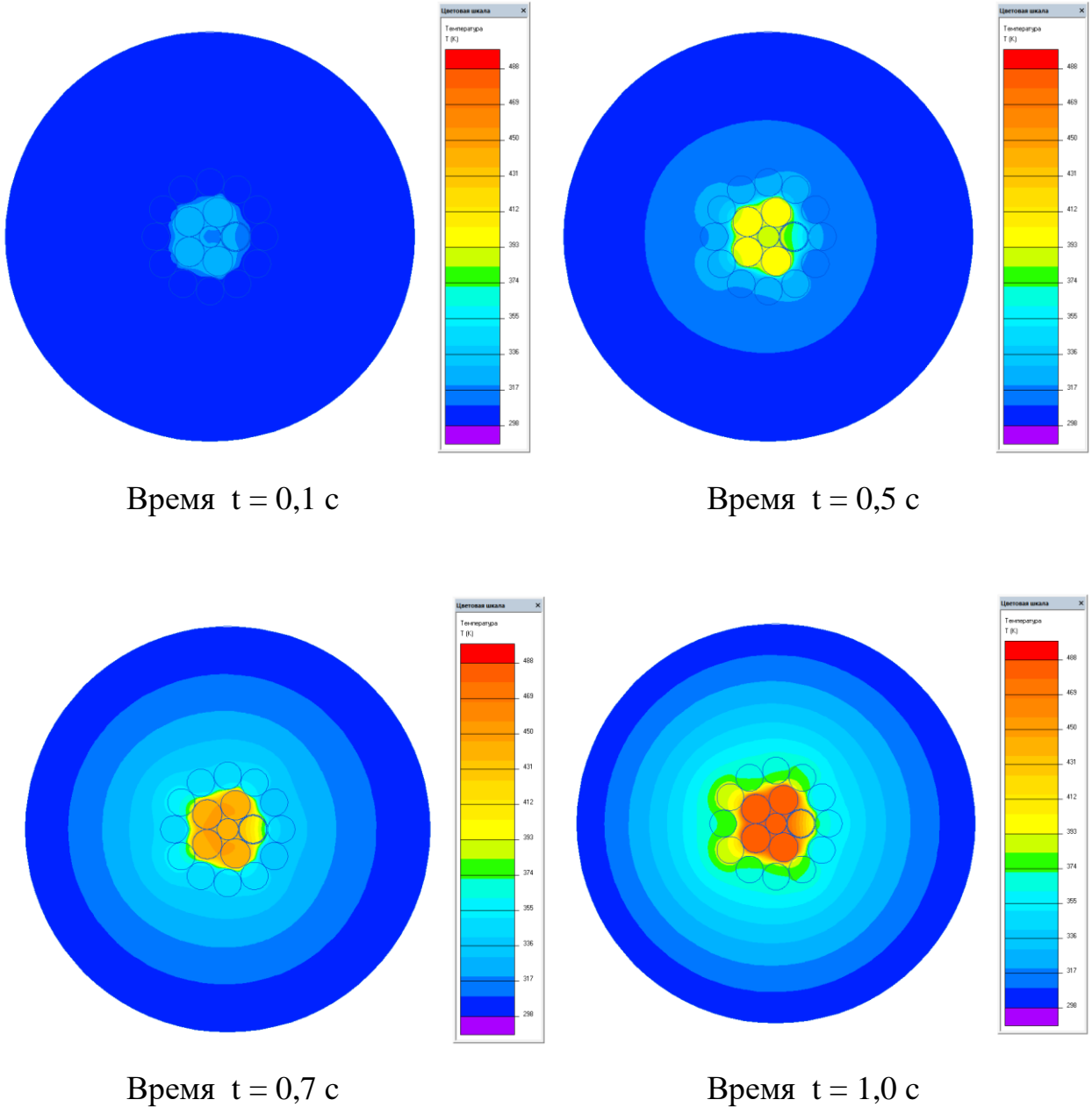


Рисунок 4.5 – Процесс нагрева кабеля ОКГТ током короткого замыкания

В качестве начального условия примем температуру кабеля равной температуре окружающей среды, которая равняется 20 градусам Цельсия. Произведём моделирование процесса нагревания кабеля током короткого замыкания на протяжении 1 секунды, с интервалами 0,1 секунды.

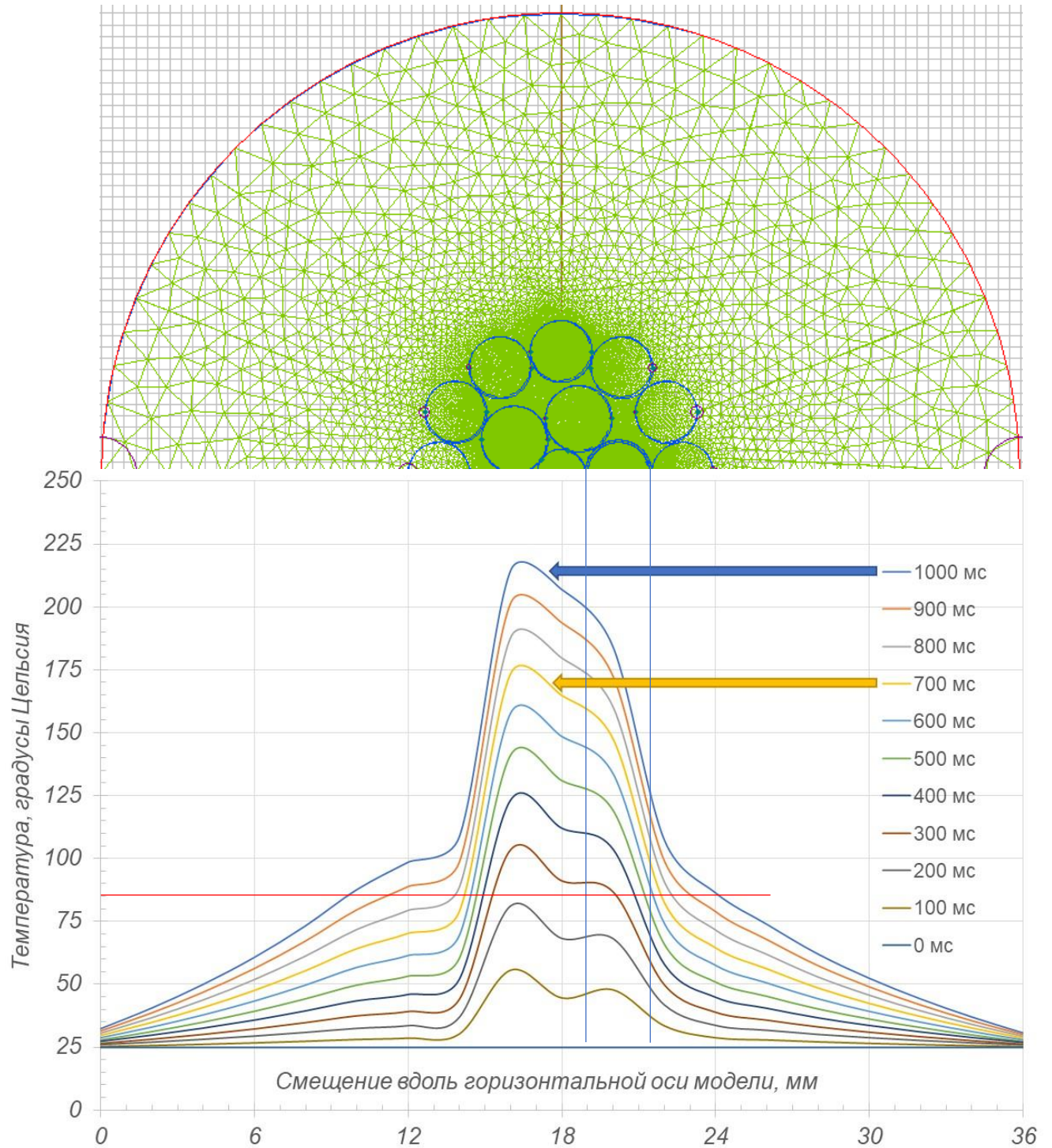


Рисунок 4.6 – Совмещённая диаграмма нагрева кабеля ОКГТ током короткого замыкания

Для каждой реперной точки по времени будем определять температуру всех областей кабеля и области вокруг кабеля. Термограммы кабеля ОКГТ, полученные в результате компьютерного моделирования на программе «*Elcut Professional 6.3*»

для четырёх моментов времени представлены на Рисунке 4.5, диаграмма изменения температуры в структуре кабеля показана на Рисунке 4.6. На Рисунке 4.6 также выделена область диаграммы, соответствующая местоположению оптического модуля.

Из термограмм следует, что оптический модуль за время равное 1 секунде разогревается до температуры, равной $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, что совпадает с паспортными характеристиками ОКГТ и свидетельствует о корректности принятой модели. Однако, как было сказано выше, частый перегрев ОКГТ токами короткого замыкания такой величины может привести к снижению срока службы оптического волокна. Красной линией на Рисунке 4.6 показана максимально допустимая длительная температура для оптических волокон, которая составляет $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ Цельсия. Как видно из диаграммы, за время равное 300 мс этот порог будет пройден, что нежелательно с точки зрения обеспечения срока службы оптоволоконной линии связи. Как следует из Рисунка 4.6 время нагревания кабеля током в 8200 А , определяемое временем срабатывания релейной защиты фидеров тяговых подстанций и поста секционирования не должно превышать 270 мс .

Для обеспечения расчётного срока службы ОКГТ, используемого в составе двухуровневой системы группового заземления опор целесообразно на первом этапе определить максимальное значение тока, протекающего по металлической части ОКГТ в аварийном режиме для всех возможных случаев питания контактной сети. Используя полученное значение тока в качестве исходного значения тока в ОКГТ, на втором этапе необходимо выполнить моделирование процесса нагрева кабеля по методике, описанной в данном разделе. По результатам моделирования и данным о времени срабатывания релейных защит на рассматриваемом участке следует сделать вывод о допустимости применения конкретного типа ОКГТ в качестве дополнительного проводника двухуровневой схемы заземления опор на конкретном участке.

4.3 Оценка снижения потенциала прикосновения к опоре при коротком замыкании

Использование системы двухуровневого заземления опор окажет влияние на напряжение, возникающее на опоре при коротком замыкании. Для сравнения величины напряжения прикосновения при использовании традиционного способа заземления и способа заземления опор, описываемого в диссертационной работе, на первом этапе рассчитаем напряжение, возникающее на тросе группового заземления в точке короткого замыкания. Исследования будем вести для установившегося процесса, не учитывая явления, возникающие в цепи в переходном режиме.

Для определения потенциала указанной точки вернёмся к рассмотрению электрической схемы замещения участка электрифицированной железной дороги постоянного тока, при условии, что точка короткого замыкания расположена левее заземляющего спуска, при одностороннем питании, Рисунок 4.7. Данная схема была получена в Главе 3 диссертационной работы.

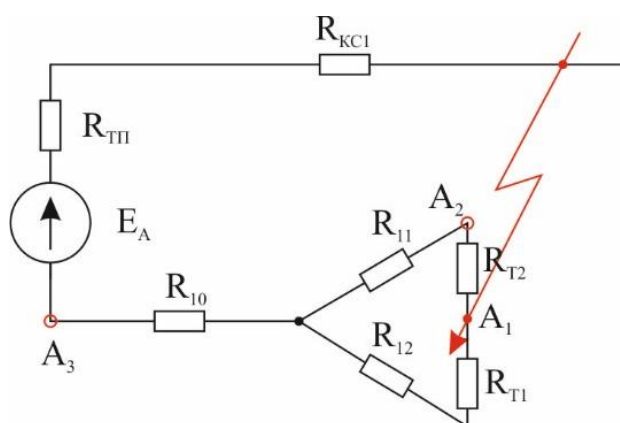


Рисунок 4.7 – Схема замещения участка постоянного тока, когда точка КЗ расположена левее заземляющего спуска

На схеме обозначены три характерных точки, которые будут использованы при расчёте потенциала троса группового заземления. Точка A_1 – место возникновения короткого замыкания, A_2 – точка присоединения заземляющего спуска к рельсовой цепи, A_3 – минусовая шина тяговой подстанции. Выбор этих

точек обусловлен следующими соображениями. Для определения напряжения прикосновения к опоре необходимо задаться величиной потенциала поверхности земли в месте установки опоры. Это значение необходимо для расчёта картины растекания тока в земле, однако ввиду наличия рельсового пути, находящегося в непосредственной близости от опоры и широкого диапазона значений переходного сопротивления рельс–земля однозначно судить о том, каков будет потенциал поверхности земли вблизи опоры весьма сложно и требует построения сложной трёхмерной модели растекания тока в земле. Однако, можно однозначно утверждать, что потенциал поверхности земли вблизи точки установки опоры будет находиться в диапазоне, ограниченном потенциалами точки A_2 – максимальному возможному значению – потенциалу рельсов в точке присоединения заземляющего спуска и точки A_3 – соответствующего минимальному возможному значению – величине потенциала минусовой шины тяговой подстанции. Ввиду того, что потенциал величина относительная, зададимся нулевым значением, от которого будем отсчитывать потенциалы остальных точек. В качестве точки с нулевым потенциалом принимаем точку A_3 . С учётом сказанного, рассчитаем потенциалы остальных точек, полагая известным величину тока короткого замыкания:

$$\varphi_{A_1} = E_A - I_{K3} \cdot (R_{ТП} + R_{KC1}). \quad (4.29)$$

$$\varphi_{A_2} = E_A - I_{K3} \cdot (R_{ТП} + R_{KC1}) - I_{K3} \cdot R_{T2} \cdot \frac{R_{T1} + R_{12}}{R_{T2} + R_{11} + R_{T1} + R_{12}}. \quad (4.30)$$

Используя эти выражения совместно определим разность потенциалов между точками A_1 и A_2 :

$$U_{A_1 A_2} = I_{K3} \cdot R_{T2} \cdot \frac{R_{T1} + R_{12}}{R_{T2} + R_{11} + R_{T1} + R_{12}}. \quad (4.31)$$

Выполним аналогичные преобразования для точки A_2 для случая, когда точка короткого замыкания располагается правее заземляющего спуска, Рисунок 4.8:

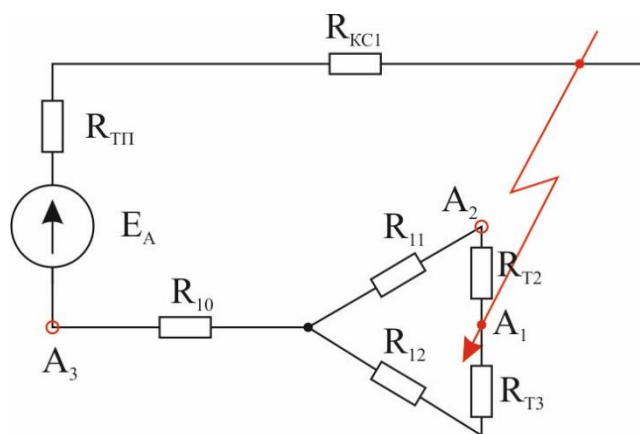


Рисунок 4.8 – Схема замещения участка постоянного тока, когда точка КЗ расположена правее заземляющего спуска

$$\varphi_{A_2} = E_A - I_{КЗ} \cdot (R_{ТП} + R_{КС1}) - I_{КЗ} \cdot R_{Т2} \cdot \frac{R_{Т3} + R_{12}}{R_{Т2} + R_{11} + R_{Т3} + R_{12}}. \quad (4.32)$$

Используя это выражение совместно с (4.10) определим разность потенциалов между точками A_1 и A_2 :

$$U_{A_1 A_2} = I_{КЗ} \cdot R_{Т2} \cdot \frac{R_{Т3} + R_{12}}{R_{Т2} + R_{11} + R_{Т3} + R_{12}}. \quad (4.33)$$

Рассчитаем потенциал точки A_1 относительно точек A_2 и A_3 для рассматриваемой в работе и традиционной схемы заземления опор. Расчёт будем вести по методике, описанной в Главе 3 с учётом выражений 4.29 и 4.31. Для следующих типов контактной сети, троса группового заземления и ВОЛС:

- подвеска М120 + 2МФ100, удельное сопротивление 0,0567 Ом/км,
- подвеска М120 + 2МФ100 + 2А185, удельное сопротивление 0,035 Ом/км,
- трос группового заземления АС–95, удельное сопротивление 0,306 Ом/км,
- трос группового заземления ПБСМ2–70, уд. сопротивление 0,88 Ом/км,
- волоконно-оптический кабель ОКГТ–1–1, уд. сопротивление 0,607 Ом/км,
- волоконно-оптический кабель ОКГТ–1–24, уд. сопротивление 0,254 Ом/км.

Результаты расчёта потенциала относительно точки A_2 представлены на Рисунке 4.9 и Рисунках Б.1–Б.7 (Приложение Б), относительно точки A_3 на Рисунке 4.10 и Рисунках В.1–В.7 (Приложение В).

Важно также учесть, заземлению подлежат все металлические элементы опоры, поэтому трос группового заземления должен иметь надёжный контакт с телом опоры. Железобетонная опора конструктивно представляет собой металлическую арматуру, находящуюся внутри толщи бетона. Бетон обладает высоким удельным сопротивлением, кроме этого, сопротивление бетона зависит от его влажности и может меняться в зависимости от погодных условий. Стальная арматура обладает сопротивлением несоизмеримо меньшим, по сравнению с бетоном, поэтому большая часть тока, стекающая по опоре в землю, будет стекать по арматурной сетке [87]. Так как переходное сопротивление опора–земля значительно больше сопротивления арматурной сетки, потенциал арматуры при протекании по ней тока практически не будет изменяться [88]. Таким образом, в дальнейших рассуждениях будем полагать поверхность опоры эквипотенциальной.

Для расчёта напряжения прикосновения к опоре при коротком замыкании учтём тот факт, что искомая величина определяется как разность потенциалов между телом опоры и поверхностью земли, на которой стоит человек. Для выполнения анализа будем моделировать подземную часть опоры цилиндрическим заземлителем, с диаметром d , погружённым под землю на глубину l . Известно [89], что потенциал точки на поверхности земли, отстоящей от центра такого заземлителя на расстояние x , можно определить по выражению:

$$\varphi = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \quad (4.34)$$

где φ – потенциал точки на поверхности земли, В;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I_3 – ток, стекающий по заземлителю в землю, А.

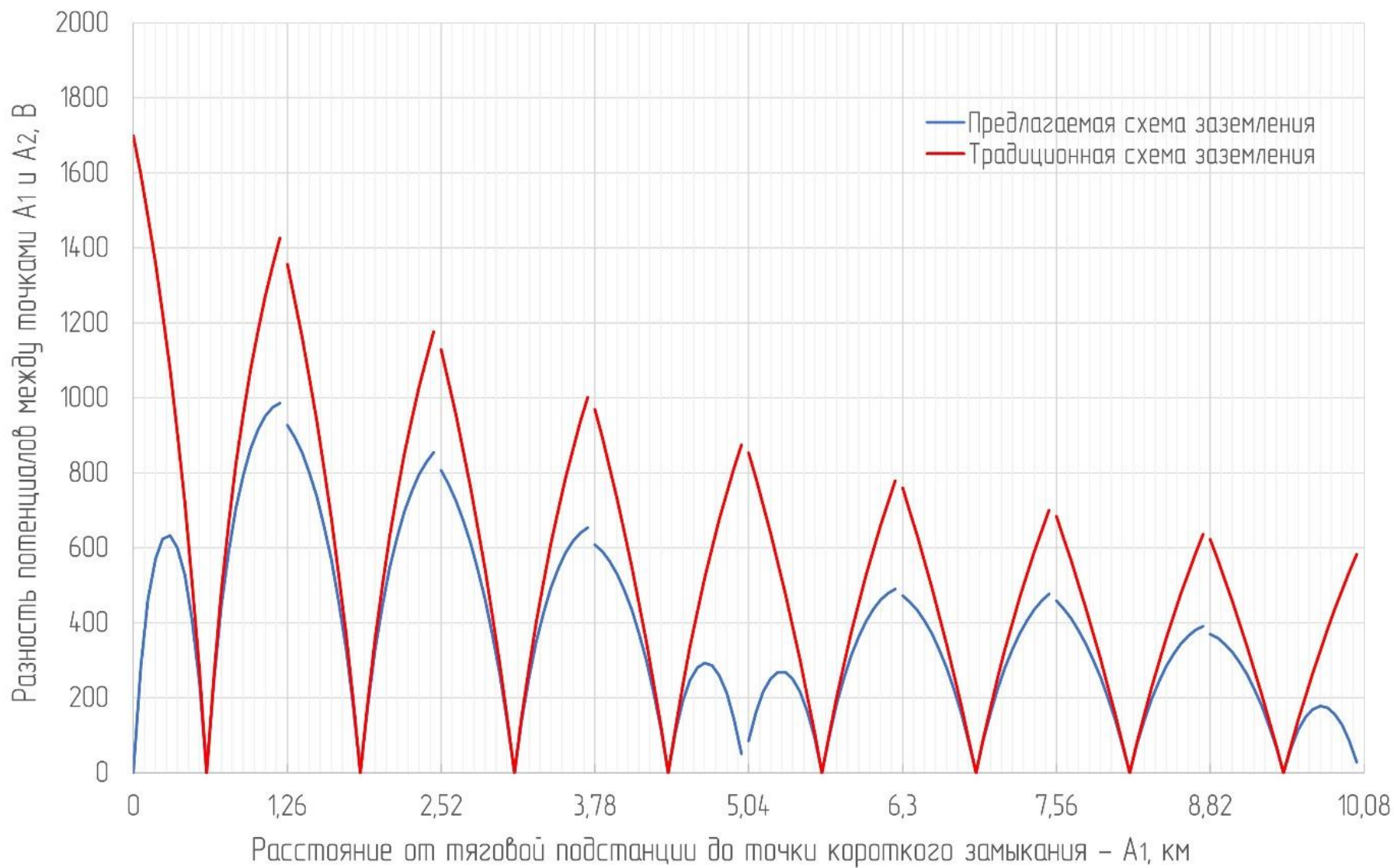


Рисунок 4.9 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95, ОКГТС–1–24

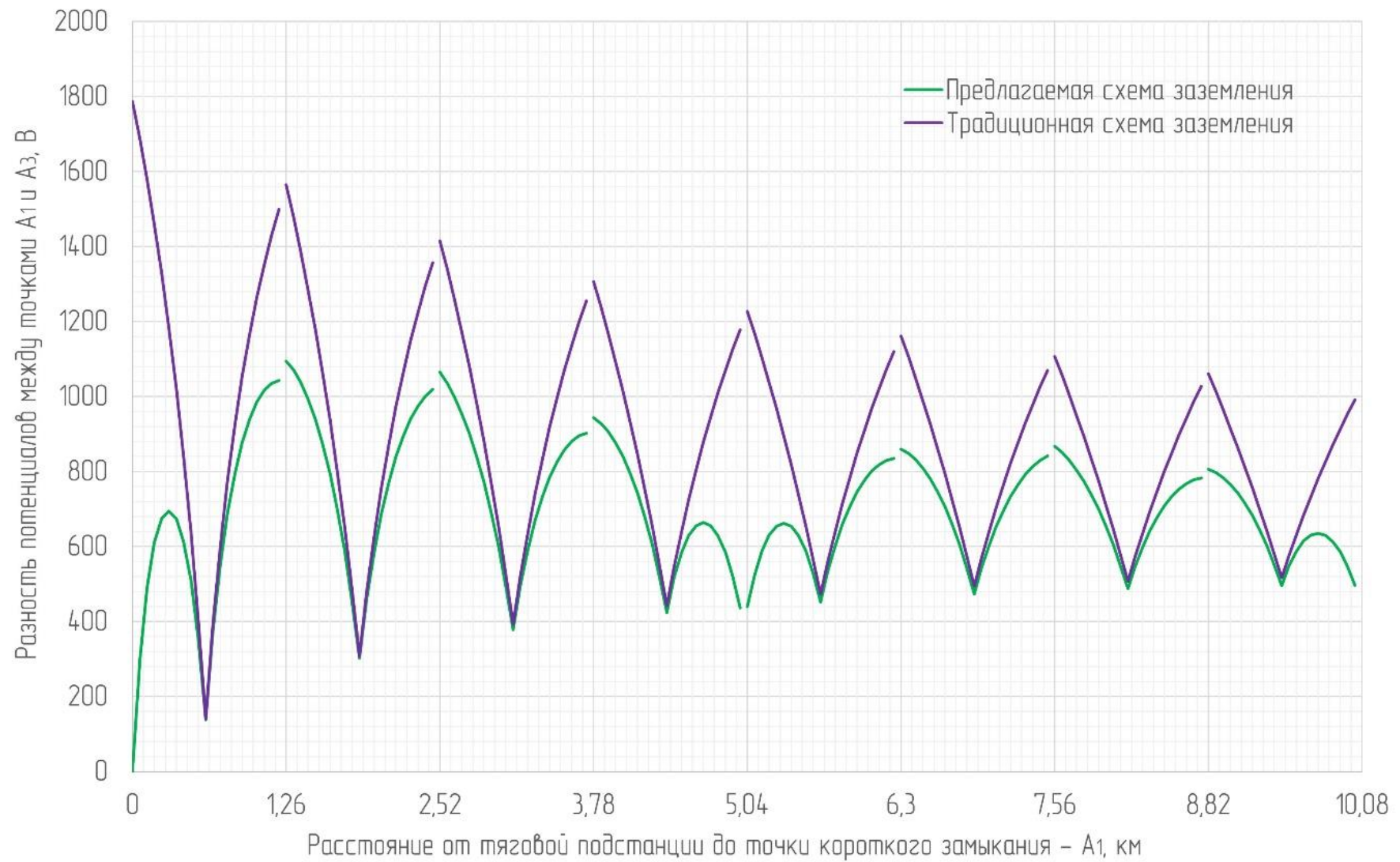


Рисунок 4.10 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95, ОКГТС–1–24

Для расчёта потенциала заземлителя используют выражение [89]:

$$\varphi_3 = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (4.35)$$

Учитывая сделанное замечание о равенстве потенциалов вдоль тела опоры и полагая данную величину известной выразим из (4.34) ток, стекающий по опоре, и подставим полученное выражение в (4.35):

$$\varphi = \varphi_3 \cdot \frac{\ln \frac{4l}{d}}{\ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}}. \quad (4.36)$$

Приняв глубину подземной части фундамента равной 5 метрам, а эквивалентный диаметр равным 0,6 метрам [90] построим диаграмму изменения потенциала поверхности земли вблизи опоры контактной сети при аварии, Рисунок 4.11.

Исходя из анализа полученной зависимости видно, что на расстоянии 1 метр от опоры разность потенциалов между поверхностью земли и телом опоры составляет около 45 % от напряжения, прикладываемого к телу опоры относительно рельсов. Благодаря явлению растекания тока в земле потенциал поверхности земли увеличивается. Максимальное значение потенциала земли будет иметь место непосредственно возле опоры, а по мере удаления от неё потенциал поверхности земли будет падать, стремясь к нулю.

На уменьшение напряжения прикосновения, приложенного непосредственно к телу человека, оказывает влияние и такой фактор, как повышение удельного электрического сопротивления поверхностного слоя земли, аналогично использованию изолирующей обуви.

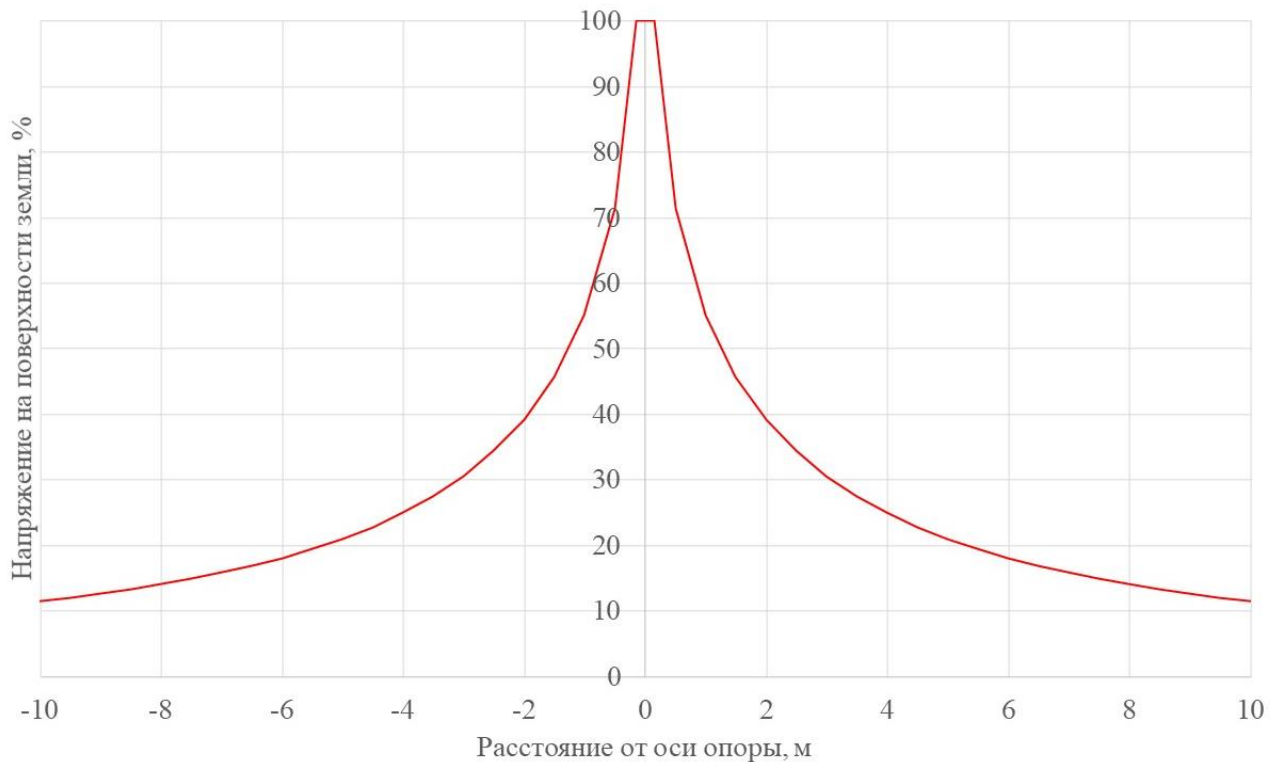


Рисунок 4.11 – Изменение потенциала поверхности земли при замыкании на опоре контактной сети, в процентах от приложенного к опоре напряжения

В результате выполненных расчётов получены возможные максимальные и минимальные значения разности потенциалов, возникающих между телом опоры и рельсовой цепью в месте аварии. По полученным данным можно однозначно утверждать, что использование предлагаемой в диссертационной работе схемы заземления опор контактной сети приводит к снижению максимальных напряжений на 25 % по сравнению с традиционной схемой заземления опор. Непосредственно величина напряжения прикосновения в работе не определялась, так как такой расчёт требует характеристик грунта, информации о расстояниях до заземлённых предметов и некоторые другие. В работе ставилась задача сравнить величину разности потенциалов, выносимых на тело опоры при существующем и предлагаемом способах организации системы группового заземления опор. Решение поставленной задачи показало эффективность предлагаемых в диссертационной работе решений с точки зрения обеспечения электробезопасности при авариях на контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока.

4.4 Оценка повышения чувствительности релейной защиты за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания при использовании дополнительного заземления

При проектировании систем релейной защиты участка железной дороги постоянного тока на первом этапе определяют основную, дополнительную и резервную защиту. Для конкретного участка определяют параметры нормального режима работы всех питающих присоединений в режиме максимального использования пропускной способности участка, эти значения будут определяющими при установлении границ нормального и аварийного режима. Далее выполняют расчёт электрических параметров аварийного режима – режима короткого замыкания. Используя полученные значения принимаются уставки релейной защиты. На данном этапе может возникнуть ситуация, когда токи нормального режима будут соизмеримы с токами аварийного режима.

Для решения возникшей проблемы, как правило, применяют следующие меры: снижение сопротивления троса группового заземления, использование дополнительных признаков при распознавании факта короткого замыкания, применение адаптивных защит, снижение сопротивления контактной сети и другие. В данной работе в качестве такой меры предлагается использование двухуровневой системы заземления опор контактной сети.

Ранее, в Главе 3, был выполнен расчёт токов короткого замыкания. Вернёмся к анализу результатов расчёта токов короткого замыкания, представленного ранее. Наличие дополнительных точек соединения ТГЗ с заземлённой оболочкой ВОЛС позволило увеличить токи в конце защищаемой зоны, что явилось результатом снижения сопротивления петли короткого замыкания, а именно той его части, которая образуется сопротивлением пути обратного тока. Ток в конце защищаемой зоны возрастает в зависимости от типа применяемых ОКГТ, что позволит существенно повысить эффективность работы токовой защиты. Используя полученные данные, выполним расчёт, показывающий степень изменения значения тока короткого замыкания в пределах защищаемой межподстанционной зоны.

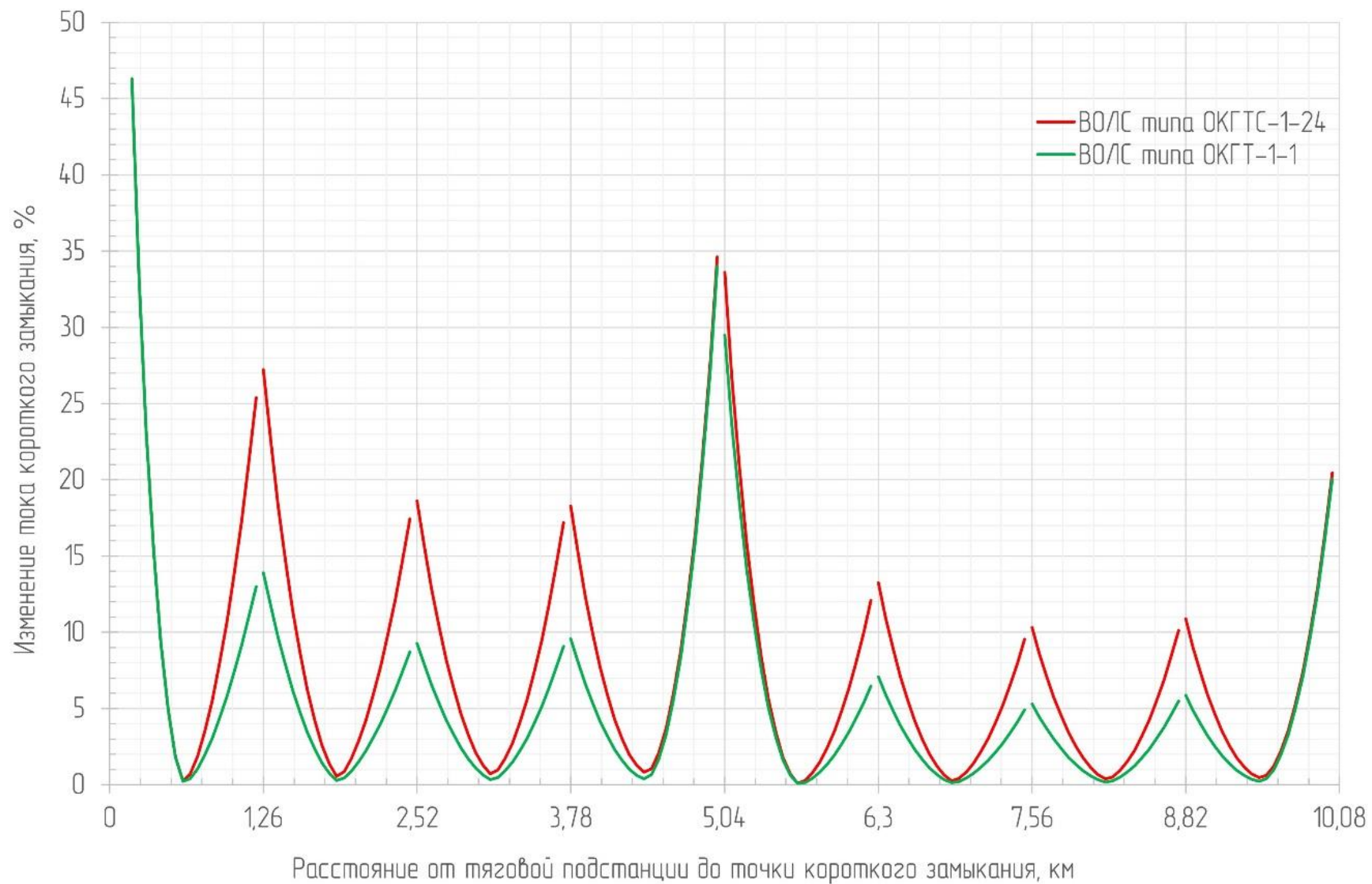


Рисунок 4.12 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95, консольное питание

На полученных диаграммах точки, соответствующие нулевому увеличению тока короткого замыкания соответствуют местам присоединения существующих заземляющих спусков к рельсовым цепям. В этих точках влияние сопротивления троса группового заземления отсутствует, а в их окрестностях сопротивление, вносимое ТГЗ сказывается незначительно, не ограничивая токи короткого замыкания при аварии. Иначе обстоит дело в случае аварии на конце зоны, защищаемой ТГЗ при традиционном способе заземления – ток КЗ, измеряемый релейной защитой мал.

Как следует из результатов анализа, представленного на диаграммах Рисунок 4.12 и на Рисунках Г.1–Г.7 (Приложении Г) при одностороннем и при двустороннем питании межподстанционной зоны на концах участка, защищаемого комплектом релейной защиты и по концам участков группового заземления опор наблюдается значительное увеличение тока КЗ. Среднее значение прироста составило от 5 до 35 процентов. Таким образом, задача увеличения чувствительности релейной защиты может быть решена за счёт более чёткого разделения нормального и аварийного режимов работы участка железной дороги.

4.5 Предполагаемые капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение двухуровневой системы группового заземления опор

4.5.1 Расчёт капитальных затрат на внедрение двухуровневой системы группового заземления опор

Задача экономического раздела диссертационной работы – рассчитать капитальные затраты на внедрение предлагаемой двухуровневой системы группового заземления опор, полагая, что на расчётном участке представляющий собой однопутный перегон железной дороги постоянного тока равный 1 км, подвешен оптоволоконный кабель встроенный в грозотрос марки ОКГТС–1–24,

металлическая оболочка которого применяется в качестве резервного пути тока короткого замыкания.

Как говорилось в Главе 2, для организации резервного пути тока короткого замыкания необходимо:

- 1 Произвести заземление троса группового заземления (ТГЗ) на концах Т-образных участков на ОКГТ, с включением в заземляющий проводник изолирующее сопряжение и диодный заземлитель.
- 2 Организовать точки повторного заземления ОКГТ на рельс.
- 3 Заземлить ОКГТ на цепи отсоса подстанций.

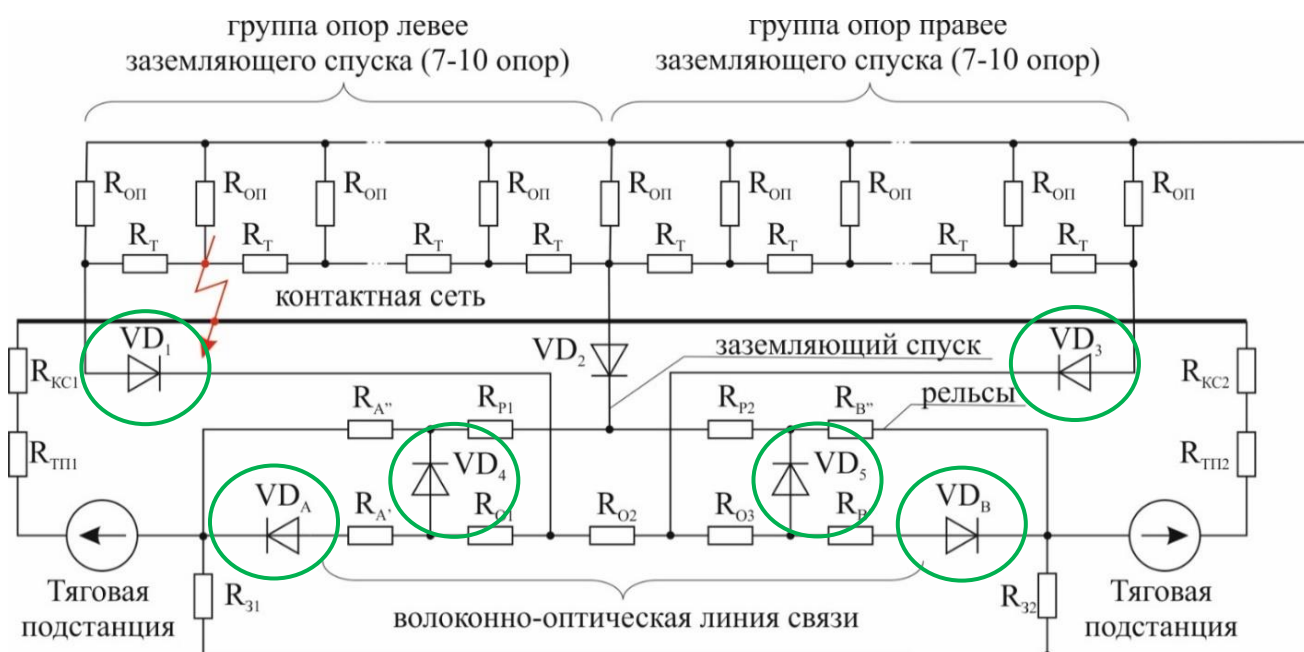


Рисунок 4.13 – Схема замещения участка с двухуровневой системой группового заземления опор контактной сети

На Рисунке 4.13 показаны дополнительные элементы, необходимые для реализации предлагаемой альтернативной системы группового заземления опор контактной сети постоянного тока.

Рассмотрим два варианта организации двухуровневого группового заземления при различных защитных устройствах.

Капитальные затраты для реализации двухуровневой системы, $K_{дсгз}$ складываются из:

– капитальных затрат на приобретение дополнительного оборудования для связи металлической оболочки кабеля ОКГТ с существующим тросом группового заземления и дополнительным заземлением ОКГТ (см. Таблицы 4.5 и 4.6):

– монтажа дополнительного оборудования – 30 % от первоначальной стоимости оборудования;

– транспортных расходов, которые составляют 30 % от первоначальной стоимости оборудования. В Таблице 4.7 приведены транспортные расходы и расходы на монтаж дополнительного оборудования.

Таблица 4.5 – Капитальные вложения на дополнительное оборудование группового заземления Вариант 1

Наименование	Количество на 1км	Стоимость, р.	
		Единица	Общее
Вариант 1			
Искровой промежуток ИП–3 УХЛ1	3,18 шт.	1650,0	5247
Заземлитель диодный ЗД–2 УХМ	1,94 шт.	15000	29100
Зажим плащечный КС– 066– 1	14,13 шт.	70,0	989,1
Стальные прутки, диаметром 12 мм	14 шт.	218,3	3056,2
Держатель спуска заземления КС– 701.2.10.503	3,88 шт.	276	1070,88
Узел крепления заземления УК ЗУ–1	3,88 шт.	3700	14356
Итого первоначальная стоимость оборудования, $K_{до1}$			53819,18

Таблица 4.6 – Капитальные вложения на дополнительное оборудование группового заземления Вариант 2

Наименование	Количество на 1км	Стоимость, р.	
		Единица	Общее
Вариант 2			
Газоразрядный прибор защиты ГРПЗ– 1У	3,18 шт.	11793,6	37503,65
Заземлитель диодный ЗД–2 УХМ	1,94 шт.	15000	29100
Зажим плашечный КС– 066– 1	14,13 шт.	70,0	989,1
Стальные прутки, диаметром 12 мм	14 шт.	218,3	3056,2
Держатель спуска заземления КС– 701.2.10.503	3,88 шт.	276	1070,88
Узел крепления заземления УК ЗУ–1	3,88 шт.	3700	14356
Итого первоначальная стоимость оборудования, $K_{до2}$			86075,83

Определим капитальные затраты [100], необходимые для реализации поставленной задачи, согласно стоимости оборудования [104–110], (Таблицы 4.5–4.6):

$$K_{ДСГЗ} = K_{до} + K_{тр} + K_{мо}, \quad (4.37)$$

где $K_{до}$ – первоначальная стоимость оборудования, р;

$K_{тр}$ – транспортные расходы, р;

$K_{мо}$ – стоимость монтажа дополнительного оборудования, р.

$$K_{ДСГЗ} = 53819,18 + 5381,92 + 16145,75 = 75346,85 \text{ р.}$$

Таблица 4.7 – Затраты на транспортировку и монтаж дополнительного оборудования группового заземления

Наименование		Стоимость, р.	
		Вариант 1	Вариант 2
Транспортные расходы, $K_{ТР}$	10 % от первоначальной стоимости оборудования	5381,92	8607,58
Монтаж дополнительного оборудования, $K_{МО}$	30 % от первоначальной стоимости оборудования	16145,75	25822,75
Итого капитальные затраты на транспортировку и монтаж		21527,67	34430,33
Итого капитальные затраты на внедрение двухуровневой системы группового заземления		75346,85	120506,2

4.5.2 Расчёт эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы складываются из текущих затрат дистанции электроснабжения [100]:

$$C = C_{зп} + C_{отч} + C_{рем} + A, \quad (4.38)$$

где $C_{зп}$ – заработная плата работников, обслуживающих систему группового заземления, р.;

$C_{отч}$ – отчисления на социальные нужды, р.;

$C_{\text{рем}}$ – расходы на текущий ремонт, р.;

A – амортизационные отчисления, р.

Рассмотрим эксплуатационные расходы только для обслуживания группового заземления (Таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Составляющие эксплуатационных расходов

Наименование		Стоимость, р.	
		Вариант 1	Вариант 2
Заработная плата работников, обслуживающих систему группового заземления [99] (0,18 чел. на 1 км), $C_{\text{зп}}$	$C_{\text{зп}} = C_{\text{окл}} + C_{\text{прем}} + C_{\text{зон}} + C_{\text{вредн}}$ <p>где $C_{\text{окл}}$ – работников, обслуживающих групповое заземление; $C_{\text{прем}}$ – премия 41 % от оклада; $C_{\text{зон}}$ – зональная надбавка 10 %; $C_{\text{вредн.}}$ – надбавка за вредность 4 %.</p>	95752,8	
Отчисления на социальные нужды, $C_{\text{отч}}$	22 % от заработной платы работников, обслуживающих систему группового заземления	21065,64	
Расходы на текущий ремонт, $C_{\text{рем}}$	4 % от первоначальной стоимости оборудования	2152,77	3443,03
Амортизационные отчисления	20 % от первоначальной стоимости оборудования	10763,84	17215,16
Итого эксплуатационные расходы на обслуживание двухуровневой системы группового заземления		129735,1	137476,63

Рассчитаем эксплуатационные расходы для Варианта 1:

$$C=95752,8+21065,64+2152,77+10763,84=129735,1 \text{ р.}$$

Расчёт эксплуатационных расходов для Варианта 2 приведён в Таблице 4.8.

Выполненные в разделе расчёты позволяют оценить дополнительные затраты, необходимые для реализации разрабатываемой в диссертационной работе двухуровневой системы заземления опор контактной сети на металлическую оболочку ВОЛС. Рассмотренные варианты реализации не являются исчерпывающими, и могут быть расширены при использовании альтернативной номенклатуры компонентов.

4.6 Выводы по главе

В Главе проведён комплексный анализ эффективности предлагаемой двухуровневой системы группового заземления.

Проведена оценка влияния токов короткого замыкания, протекающих по металлической оболочке на его характеристики и срок службы.

Результаты исследований показали, что для выбранного типа оптического кабеля температура нагрева не превышает паспортных показателей.

Предложен алгоритм проверки волоконно-оптического кабеля на термическую стойкость при использовании системы двухуровневого заземления опор контактной сети.

Сравнительный анализ величины напряжения прикосновения для существующей системы и предлагаемой показал, что при двухуровневой системе максимальные значения напряжений снижаются минимум на 25 % по сравнению с традиционной схемой заземления опор.

Проведённые исследования показали, что при использовании предлагаемого решения, наблюдается увеличение тока КЗ. Среднее значение прироста тока аварийного режима лежит в диапазоне от 25 до 30 %.

В экономическом разделе рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение предлагаемой двухуровневой системы группового заземления опор для двух вариантов при различных защитных устройствах, которые позволили оценить затраты на реализацию разработанной в диссертации системы заземления опор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) На основе анализа проведённых исследований установлено, что решающий вклад в формирование полного сопротивления петли короткого замыкания вносит удельное сопротивление троса группового заземления опор контактной сети. При этом наибольшее влияние этот факт оказывает на участках железной дороги постоянного тока, удалённых от тяговой подстанции.

2) Разработаны принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока, предполагающие использование металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны и выбран наиболее целесообразный вариант подключения троса группового заземления к ОКГТ.

3) Разработана математическая модель и выполнено моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи. Использование двухуровневой схемы заземления опор контактной сети позволяет снизить сопротивление петли короткого замыкания, при чём на конце защищаемой зоны такое решение позволяет повысить ток короткого замыкания на 25–30 % по сравнению с традиционной схемой заземления опор.

4) Проведена оценка эффективности применения системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи, показавшая, что предлагаемая система заземления опор обладает повышенными характеристиками надёжности, по сравнению с традиционной схемой заземления опор. По критерию обеспечения непрерывности пути тока короткого замыкания надёжность предлагаемой системы увеличена в среднем на 16 % по сравнению с традиционной системой.

5) Выполнена оценка влияния токов короткого замыкания, протекающих по металлической оболочке ОКГТ на нормативный срок службы, которая показала, что при принятии решения о возможности применения конкретного типа кабеля ОКГТ в

качестве дополнительного проводника в системе группового заземления опор необходимо руководствоваться рассчитанной величиной доли тока КЗ в ОКГТ и временем срабатывания релейной защиты на рассматриваемом участке. Предложен алгоритм проверки волоконно-оптического кабеля на термическую стойкость при использовании системы двухуровневого заземления опор контактной сети.

б) Проведён сравнительный анализ величины напряжения прикосновения для существующей и усовершенствованной системы, который показал, что при двухуровневой системе заземления опор максимальные значения напряжения прикосновения снижаются минимум на 25 % по сравнению с существующей схемой заземления опор.

7) Результаты диссертационного исследования внедрены в филиале АО «Росжелдорпроект» – Ростовском проектно-изыскательском институте «КАВЖЕЛДОРПРОЕКТ» и могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих участков электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Перспективы дальнейших исследований по данной работе.

Полученные в работе принципы интеграции волоконно-оптической линии связи с системой заземления опор контактной сети могут быть использованы при решении вопроса повышения эффективности системы заземления на переменном токе с исследованием влияния электромагнитных полей на работу кабеля ОКГТ.

Разработанная технология повышения эффективности системы заземления путём интеграции с волоконно-оптической линией связи открывает перспективу применения кабеля ОКГТ в качестве канала связи для передачи технологической информации между объектами тягового электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года // Утв. Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № № 877-р // [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/>.

2 Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года, утверждённая распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р.

3 **Гапанович, В. А.** Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.: под ред. В. А. Гапановича. – М. : Дом МИСиС, 2012. – 620 С. ISBN 978-5-87623-647-0.

4 Стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 07.021.5-201Х: Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки, Ч.5 «Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока», М: 2017 . – 89 с.

5 Правила переключений в электроустановках, утверждённые приказом Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757. Режим доступа: Приказ Минэнерго РФ от 13.09.2018 N 757 – Редакция от 23.06.2022 – Контур. Норматив (kontur.ru).

6 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии, утверждённые приказом Минэнерго России от 12 августа 2022 г. № 811. Режим доступа: Приказ Минэнерго РФ от 12.08.2022 N 811 – Редакция от 12.08.2022 – Контур. Норматив (kontur.ru).

7 СТО РЖД 07.021.1–2019 Стандарт ОАО «РЖД». Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах электроснабжения. Утв. и введён в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 15 января 2020) № 37/р.

8 **Фигурнов, Е. П.** Релейная защита: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Е. П. Фигурнов. – Москва: Желдориздат, 2002. – 720 С. ISBN 5-94069-013-0.

9 **СТО РЖД 07.021.5–2018** Стандарт ОАО «РЖД». Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Утв. и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 08.05.2018) № 918/р.

10 **Жарков, Ю.И.** Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных токовых нагрузках / Ю.И. Жарков, Е.П. Фигурнов. // Электрификация транспорта, 2014. – № 7. – С. 28–31.

11 **Бей, Ю. М.** Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. – Москва: Транспорт, 1986. – 319 с.

12 **Бондарев, Н. А.** Контактная сеть: учебник для студентов техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / Н. А. Бондарев, В. Е. Чекулаев. – М.: Маршрут, 2006. – 590 С. ISBN 5-89035-315-2.

13 **Почаевец, В. С.** Электрические подстанции: учебник / В. С. Почаевец. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 491 с. ISBN 978-5- 89035-679-6.

14 **Найфельд, М. Р.** Заземление и другие защитные меры / М. Р. Найфельд. – М.: «Энергия», 1975. – 104 с.

15 **Хариков, В. Ф.** Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий / В. Ф. Хариков. – М.: Транспорт, 1987. – 95 с.

16 **Векслер, М. И.** Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

17 **Якимов, Г. Б.** Контактная сеть и воздушные линии. Иллюстрированное пособие по техническому обслуживанию и ремонту контактной сети и воздушных линий / Г. Б. Якимов. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» – М.: ТРАНСИЗДАТ, 2006. – 296 с.

18 **Демиденко, И. С.** Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/Демиденко Иван Сергеевич. – Новосибирск, 2013. – 167 с. Режим доступа: netess.ru/3elektrotehnika/579986-1-povishenie-effektivnosti-zaschiti-tyagovoy-seti-postoyannogo-toka.php.

19 **Кузнецов, К. Б.** Защитное заземление опор контактной сети с помощью стального заземляющего устройства вместо группового заземления опор тросом из цветных металлов / К. Б. Кузнецов, В.В. Павлов УрГУПС Режим доступа: http://science-bsea.narod.ru/2000/dorogi_2000/kuznecov.htm.

20 **Кузнецов, К. Б.** Устройство группового заземления опор контактной сети: патент / К. Б. Кузнецов, Д.В. Лесников. – УрГУПС Режим доступа: RU155366U1 - УСТРОЙСТВО ГРУППОВОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ – Яндекс. Патенты (yandex.ru).

21 **Лесников, Д. В.** К оценке эффективности протяжённых заземляющих устройств опор контактной сети постоянного тока / Д.В. Лесников// Тезисы докладов десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0», Ч.2, Санкт-Петербург. – 2019 г. С. 20–21.

22 **Дынькин, Б. Е.** Анализ отказов релейных защит путём статистического моделирования их работы / Б. Е. Дынькин // Сб. научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». Ростов. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д. 2019. – С. 24–28.

23 **Косарев, Б. И.** Совершенствование защиты тяговых сетей постоянного тока при отсоединённых от рельсов опорах контактной сети / Б. И. Косарев, А.В. Симаков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. – №11 – С.14–18.

24 **Косарев, А. Б.** Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта, М: Интекст, 2008. – 480 с.

25 ГОСТ 33799–2016 Правила подвески самонесущего волоконно-оптического кабеля на опорах контактной сети железной дороги и линий электропередачи напряжением выше 1000 В. Издания. Межгосударственный

стандарт. – М.: Стандартимформ, 2016. – 12 С. Режим доступа: ГОСТ 33799-2016 | Просмотр документа | Элек.ру (elec.ru).

26 ЦИС–ЦЭ–842 Инструкция по технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи ОАО «РЖД» (Утв. ОАО «РЖД» 09.10.2017). – М.: – 2017. Режим доступа: Об утверждении инструкции по технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи ОАО "РЖД" от 09 октября 2017 – docs.cntd.ru.

27 ПОТ РЖД–4100612–ЦСС–214–2021 Правила по охране труда при технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи в ОАО "РЖД" (Утв. ОАО «РЖД» 24.02.2021). – М.:2021. Режим доступа: Об утверждении Правил по охране труда при технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи в ОАО "РЖД" от 24 февраля 2021 – docs.cntd.ru.

28 **Бочев, А. С.** Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / А.С. Бочев, Ю.И. Филиппов, Э.Е. Асс, Л.Е. Попов, Г.Е. Соловьев, В.А. Осипов, А.С. Гайворонский, В.В. Кречетов, М.Р. Прокопович // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 3. – С. 20.

29 **Бочев, А. С.** Электротермическая деградация оптического кабеля / А.С. Бочев, Ю.И. Филиппов, Э.Е. Асс, Л.Е. Попов, Г.Е. Соловьев, В.А. Осипов, А.С. Гайворонский, В.В. Кречетов, М.Р. Прокопович // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 4. – С. 20.

30 **Бочев, А. С.** Влияние переменных электромагнитных полей высокой напряжённости на интенсивность деградационных процессов в структуре волоконно-оптических кабелей / А.С. Бочев, Г.Е. Соловьев, В.А. Осипов, О.В. Невретдинова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 2(34). – С. 94–99.

31 **Осипов, В. А.** Свойства кевлара в структуре ВОК под действием равномерного переменного электромагнитного поля высокой напряжённости / В. А. Осипов, Е.В. Гороховский // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт – 2011», май 2011 г. в 3-х частях. Часть 1. Естественные

и технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов н/Д. – 2011. – С. 401.

32 Инструкция по предотвращению электротермической деградации волоконно-оптических кабелей, подвешенных на опорах контактной сети участков железных дорог ОАО «РЖД» с электротягой переменного тока. Утв. Вице-президент ОАО «РЖД» В. Н. Сазонов 05.06.2006.

33 ЦЭ–191 Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах (в ред. Указания МПС от 01.01. 2001 N М–1954 У). – М.: – 1993. Режим доступа: Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах (стр. 1) | Авторская платформа Pandia.ru.

34 Правила устройства электроустановок, 7 издание, 2018 г. <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>.

35 **Марквардт, К.Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж.-д. транспорта / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1965. – 464 с.

36 **Марквардт, К.Г.** Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1/ К. Г. Марквардт: под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.

37 **Марквардт, К.Г.** Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2/ К. Г. Марквардт: под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с.

38 **Горошков, Ю. И.** Контактная сеть: учебник для техникумов. 3-е изд., перераб. и доп. / Ю.И. Горошков, Н.А. Бондарев. – М.: Транспорт, 1990. – 399 с.

39 Оптический кабель ОКГТ в грозозащитном тросе. Оптический кабель ОКФП в фазном проводе и арматура. http://smartenergo.net/nkt/okgt_okfp.pdf/.

40 Кабель ОКГТ. [Электронный ресурс] // Сайт компании «Транс-ВОК». – Режим доступа: <http://www.transvoc.ru/production/okms.php> (доступ свободный) – загл. с экрана. – Яз. рус.

41 **Капкаев, А. А.** Алгоритм выбора металлизированного волоконно-оптического кабеля для его работы в качестве комбинированного экранирующего провода тяговой сети электрических железных дорог / А. А. Капкаев,

Е. Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – № 4. – 2016. Электронный журнал, Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3850>.

42 **Капкаев, А. А.** Влияние магнитного поля контактной сети на волоконно-оптические линии передачи железнодорожного /А.А. Капкаев // Сборник научных трудов, «Транспорт; Наука, образование, производство», Т.3: Технические и естественные науки. – 2017. – С. 120.

43 **Капкаев, А. А.** Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.07 / Капкаев Андрей Андреевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 208 С. Режим доступа: Диссертация на тему ««Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи» выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники»», скачать бесплатно автореферат по специальности ВАК РФ 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (dissercat.com).

44 **Бочев, А. С.** Подвесной зажим для волоконно-оптического кабеля Патент РФ на полезную модель №66618 / А.С. Бочев, Г.Е. Соловьев, В.А. Осипов, Ю.И. Филиппов, Э.Е. Асс, В.Д. Ленкин.

45 Муфта МОПГ–МП–1/216–6КТ3645–К ССД // ЗАО "Связьстройдеталь" режим доступа: <https://www.ssd.ru/mufta-mopg-mp-1-216-6kt3645-k>.

46 **Осипова, А. И.** Групповое заземление опор тяговой сети переменного тока грозозащитным тросом с оптоволоконным сердечником // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» "Транспорт–2016" Т.2.» Технические и естественные науки». – Ростов-на-Дону: РГУПС. – 2016. – С. 296–299.

47 **Осипова, А. И.** Альтернативный способ организации группового заземления опор тяговой сети переменного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – №1. – С. 103–109.

48 **Осипова, А.И.** Комплексное решение проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) / В. А. Осипов,

А. И. Осипова // Сборник научных трудов "Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России" ("ТрансПромЭк – 2019"), Т. 1 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС. – 2019. – С. 212–215.

49 **Осипова, А.И.** Организация группового заземления опор на участках постоянного тока // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» "Транспорт–2019" Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 98–101.

50 **Осипова, А.И.** Комплексный подход к организации системы группового заземления опор контактной сети на железных дорогах постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 6–8.

51 **Осипова, А.И.** Особенности организации альтернативной схемы заземления опор контактной сети постоянного тока /А.И. Осипова, В.А. Осипов //Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – С. 45–47.

52 **Осипова, А.И.** Двухуровневая система группового заземления опор контактной сети постоянного тока / А.И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов Транспорт: наука, образование, производство ("Транспорт–2021") Т. 2 Технические науки. – Ростов-н/Д: РГУПС, 2021. – С. 75–78.

53 **Осипова, А.И.** Комплексное решение проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) / В. А. Осипов, А. И. Осипова // Сборник научных трудов "Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России" ("ТрансПромЭк – 2019"), Т. 1 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС. – 2019. – С. 212–215.

54 **Осипова, А. И.** Сопротивление системы группового заземления и его влияние на чувствительность релейной защиты / А. И. Осипова, В. А. Осипов //

Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №4 (88). – С. 161–169. – DOI: 10.46973/0201-727X_2022_4_161.

55 **Осипова, А.И.** Варианты организации волоконно-оптических линий связи на электрифицированных железных дорогах /А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2023. – С. 67–70.

56 **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники: учебник для ВУЗов // Л. А. Бессонов. – М: Высшая школа. –1987. – 264 с.

57 **Осипова, А. И.** Варианты подключения волоконно-оптической линии связи к тросу группового заземления / А. И. Осипова, В.А. Осипов, В.Н. Носков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №1(85). – С. 153–159. – DOI: 10.46973/0201-727X_2022_1_153.

58 **Осипова, А.И.** Дополнительное заземление опор контактной сети постоянного тока на металлическую оболочку волоконно-оптических линий связи/ А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. – № 4 (61). – С. 157–162.

59 СТО «Руководство по расчёту режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределённого контроля температуры ОКГТ в режиме плавки». Утверждён и введён в действие: Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.05.2012 № 264.

60 ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. Методические указания по борьбе с гололёдом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения. Книга 2. Москва, 2004. – 132 с.

61 ГОСТ 16772–77 Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. – М: СИПК Издательство стандартов. – 1999.

62 **Осипова, А.И.** Организация плавки гололёда на резервном тросе двухуровневой системы заземления опор на примере участка Лазаревская –

Якорная щель / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №1 (81). – С. 161–168. ISSN 0201-727X. DOI:10.46973/0201–727X_2021_1_161.

63 **Осипова, А.И.** К вопросу о борьбе с гололёдообразованием на волоконно-оптических линиях связи, используемых для группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 155–158.

64 **Ефимов, А. В.** Надёжность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М: – 2000. – 512 с.

65 **Волков, Н.Г.** Надёжность электроснабжения: учебное пособие / Н. Г. Волков, А. А. Сивков, А. С. Сайгаш: Томский политехнический университет. – 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2011. – 160 с.

66 **Диллон, Б.** Инженерные методы обеспечения надёжности систем: пер. с англ. / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М: Мир. – 1984. – 318 с.

67 **Глазунов, Л. П.** Основы теории надёжности автоматических систем управления учебное пособие для вузов / Л. П. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. – Л: Энергоатомиздат, Ленинград. отдел.– 1984. – 208 с.

68 **Северцев, Н. А.** Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке: учебное пособие для вузов / Н. А. Северцев. – М: Высш. школа. – 1989. – 432 с.

69 **Сердинов, С. М.** Повышение надёжности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог / С. М. Сердинов. – М: Транспорт. – 1985. – 301 с.

70 **Осипова, А.И.** Определение показателей надёжности двухуровневой системы группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №4 (80). – С. 145–150. – DOI:10.46973/0201–727X_2020_4_145.

71 **Осипова, А.И.** Повышение надёжности и безопасности работы системы заземления опор контактной сети на участках постоянного тока // Сборник научных

трудов Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 91–93.

72 **Фигурнов, Е. П.** Релейная защита систем электроснабжения. Расчёты защит от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1 Тяговые сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ: учебное пособие / Е. П. Фигурнов., Т. Е. Петрова. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 1998. – 90 с.

73 СТО 56947007–33.180.10.173–2014 Методические указания по расчёту термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных линиях электропередачи. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», утверждённые приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.05.2014 г. № 237. Режим доступа: [СТО-56947007-33.180.10.173-2014.pdf \(fsk-ees.ru\)](#).

74 **Владимирский, Б. М.** Математика. Общий курс: учебник. 3-е изд., стер. // Б. М. Владимирский, А. Б. Горстко, Я. М. Ерусалимский. – СПб.: Издательство «Лань». – 2006. – 960 с. ISBN 5-8114-0445-X.

75 **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники. Т.2 : книга для студентов электротехнических, энергетических радиотехнических ВУЗов / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Ленинград: «Энергия». – 1967. – 517 с.

76 Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. – 3-е изд. перераб. п доп. – М.: «Энергия». – 1980. – 456 с.

77 **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение. – 1991. – 304 с. ISBN 5-283-04513-7.

78 **Осипова, А.И.** Моделирование и расчёт токов короткого замыкания в системе постоянного тока с дополнительным тросом группового заземления опор контактной сети / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского

государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 127–133. – ISSN 0201-727X.

79 **Осипова, А.И.** Особенности расчёта токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции Современное развитие науки и техники (Наука–2020) . – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 271–274.

80 **A.I. Osipova** Modeling and calculation of SC currents for alternative group grounding system for the dc contact line supports / A.I. Osipova, V.A. Osipov // Journal of physics Conference series. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021- Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres" Том 2131. 2021 DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042067.

81 **Осипова, А. И.** Расчёт токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8489.

82 **Бочев, А. С.** Теплофизические процессы в объёме волоконно-оптических кабелей и минимизация деградации структуры материалов / А. С. Бочев, Г. Е. Соловьев, А. А. Капкаев // Конференция «Телекоммуникационные, информационные и логистические технологии на транспорте» «ТелекомТранс-2010», Заседания отраслевых советов координационного транспортного совещания государств-участников СНГ: сборник докладов. – Ростов н/Д: Рост. гос.ун-т. путей сообщения. – 278 с. 21–22 апреля 2010 г.

83 **Бадёр, М. П.** Электромагнитная совместимость: учебник для вузов ж.-д. транспорта // М. П. Бадёр. – М: УМК МПС. – 2002. – 638 с. ISBN 5-89035-065-X.

84 **Косарев, А. Б.** Основы электромагнитной совместимости систем электроснабжения железнодорожного транспорта // А. Б. Косарев. – М: Интекст. – 2008. – 480 с. ISBN 978-5- 89277-086-6.

85 **Лариков, Л. Н.** Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко – Киев.: «Наукова думка». –1985. – 437 с.

86 ООО «Саранскабель – Оптика» // Электронный сайт компании ООО «СКО» // URL: sarko.ru/new/.

87 **Лесников, Д. В.** О подходе к расчёту электрического сопротивления железобетонных конструкций / Д.В. Лесников, А. В. Паранин // Известия Транссиба. – 2017. – №3. – С. 102–114.

88 **Лесников, Д.В.** Совершенствование тяговых сетей постоянного тока с помощью протяжённых заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети: дис канд. техн. наук: 05.22.07 / Лесников Дмитрий Валентинович. – Екатеринбург, 2018. – 279 С. Режим доступа: Лесников, Дмитрий Валентинович - Совершенствование тяговых сетей постоянного тока с помощью протяжённых заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.07 – Search RSL.

89 **Долин, П. А.** Основы техники безопасности в электроустановках // П. А. Долин. – М: Энергоатомиздат. – 1984. – 64 с.

90 ГОСТ 32209–2013 Фундаменты для опор контактной сети железных дорог. Межгосударственный стандарт. – М: Стандартинформ. – 2014. – 438 с.

91 Стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 15.013.5–2015: «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Электрическая безопасность. Общие требования», М: 2015 – 160 с.

92 Правила безопасности при эксплуатации контактной сети и устройств электроснабжения автоблокировки железных дорог ОАО «РЖД», утверждённые распоряжением ОАО «РЖД» от 11 февраля 2021 г. № 265/р. – М.: –168 с.

93 Инструкция по безопасности для электромонтёров контактной сети, утверждённая распоряжением ОАО «РЖД» от 16 февраля 2021 г. № 301/р. – М.: – 2023. – 232 с.

94 Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок, утверждённые приказом Минтруда России от 15 декабря 2020 г. № 903н. Режим доступа: Приказ Минтруда РФ от 15.12.2020 N 903Н – Редакция от 29.04.2022 – Контур. Норматив (kontur.ru).

95 Правила электробезопасности для работников ОАО «РЖД» при обслуживании устройств и сооружений контактной сети и линий электропередачи, утверждённые распоряжением ОАО «РЖД» от 19 апреля 2016 г. № 699р. – М.: – 2023. – 92 с.

96 **Крутяков, В. С.** Охрана труда на железнодорожном транспорте: справочная книга // В. С. Крутяков, А. Л. Левицкий и др.: под ред. В. С. Крутякова. – М: Транспорт. –1987. – 312 с. ISBN 5-277-00598-6.

97 **Осипова, А. И.** Исследование режимов работы кабеля ОКГТ в качестве троса группового заземления / А. И. Осипова //Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов. ("Транспорт–2018"). Ростов-на-Дону: РГУПС, 2018. – С. 303–306.

98 **Осипова, А.И.** Оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции Транспорт: наука, образование, производство ("Транспорт–2022") Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. – С. 37–41.

99 **Осипова, А. И.** Обеспечение термической стойкости волоконно-оптического кабеля, входящего в систему двухуровневого заземления опор // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – №1 (89). – С. 274–281. – DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_274.

100 **Рачек, С. В.** Экономическое обоснование технических решений: метод. рекомендации / С. В. Рачек и др. – Екатеринбург : УрГУПС: 2018. – 79 с.

101 **Терёшина, Н. П.** Экономика железнодорожного транспорта / под ред. Н. П. Терёшиной, Л. П. Левицкой, Л. В. Шкуриной. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте»: 2012. – 536 с.

102 **Будрина, Е. В.** Экономика транспорта / под ред. Е. В. Будриной. – М.: Издательство Юрайт: 2023. – 366 с. ISBN 978-5-534-00238-6.

103 Нормы времени и нормативов численности на техническое обслуживание и текущий ремонт устройств электроснабжения СЦБ и других

нетяговых потребителей утверждённые распоряжением ОАО «РЖД» от 04 июня 2013 г. № 1251р. – М.: – 140 с.

104 Газоразрядный прибор защиты контактной сети и высоковольтных линий. Режим доступа: ksrzd.ru. Газоразрядный прибор защиты контактной сети и высоковольтных линий – искровой промежуток многократного действия ГРПЗ.

105 Контактная сеть – Все для контактной сети в Москве. Режим доступа: stroyremont-td.ru стройремонт.

106 Клемма заземления КС–124 – Контактная сеть. Режим доступа: xn--80aarpbqsebafe4kpb.xn--p1ai Контактная сеть.

107 АС-50 | Интернет-магазин ЭТМ iPRO (etm.ru).

108 Провод ПБСМ–70 биметаллический сталемедный, цена в Екатеринбурге от компании ЭНЕРГОМАГИСТРАЛЬ. Режим доступа: xn--80aahbhvwdgmugmo7mb.xn--p1ai.

109 Провод ПС– 95 купить с доставкой по России. Режим доступа: ps25.ru.

110 Заземлитель диодный ЗД–2 УХЛ1. Режим доступа: legion-energo.com.

111 Типовой проект КС–160.4.0–09 Узлы контактной подвески КС–160–3 постоянного тока. Схемы подвески, сопряжений, узлы контактной сети неизолированными наклонными консолями. Режим доступа: stroyinf.ru.

112 **Осипова, А.И.** Предполагаемые капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока на металлическую оболочку ВОЛС // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2023. – С. 100–103.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Основные научные результаты диссертации отражены:****– в работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях****(из перечня Минобрнауки России):**

1 **Осипова, А.И.** Моделирование и расчёт токов короткого замыкания в системе постоянного тока с дополнительным тросом группового заземления опор контактной сети / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 127–133. – ISSN 0201-727X.

2 **Осипова, А.И.** Определение показателей надёжности двухуровневой системы группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №4 (80). – С. 145–150. – DOI:10.46973/0201-727X_2020_4_145.

3 **Осипова, А.И.** Организация плавки гололёда на резервном тросе двухуровневой системы заземления опор на примере участка Лазаревская – Якорная щель / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №1 (81). – С. 161–168. ISSN 0201-727X. DOI:10.46973/0201-727X_2021_1_161.

4 **Осипова, А.И.** Варианты подключения волоконно-оптической линии связи к тросу группового заземления / А. И. Осипова, В.А. Осипов, В.Н. Носков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №1(85). – С. 153–159. – DOI: 10.46973/0201-727X_2022_1_153.

5 **Осипова, А. И.** Сопротивление системы группового заземления и его влияние на чувствительность релейной защиты / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №4 (88). – С. 161–169. – DOI: 10.46973/0201-727X_2022_4_161.

6 **Осипова, А. И.** Обеспечение термической стойкости волоконно-оптического кабеля, входящего в систему двухуровневого заземления опор // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – №1 (89). – С. 274–281. – DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_274.

7 **Осипова, А. И.** Расчёт токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8489.

– **в работах, опубликованных в изданиях, включённых в международную базу цитирования SCOPUS:**

8 **A. I. Osipova** Modeling and calculation of SC currents for alternative group grounding system for the dc contact line supports / A.I. Osipova, V.A. Osipov // Journal of physics Conference series. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021- Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres" Том 2131. 2021 DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042067.

– **публикации в других изданиях:**

9 **Осипова, А.И.** Повышение надёжности и безопасности работы системы заземления опор контактной сети на участках постоянного тока // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 91–93.

10 **Осипова, А. И.** Организация группового заземления опор на участках постоянного тока // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» "Транспорт–2019" Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 98–101.

11 **Осипова, А. И.** Особенности расчёта токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции Современное развитие науки и техники (Наука–2020) . – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 271–274.

12 **Осипова, А. И.** Комплексный подход к организации системы группового заземления опор контактной сети на железных дорогах постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов IV Международной научно-

практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 6–8.

13 **Осипова, А. И.** К вопросу о борьбе с гололёдообразованием на волоконно-оптических линиях связи, используемых для группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт–2020»). – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 155–158.

14 **Осипова, А. И.** Двухуровневая система группового заземления опор контактной сети постоянного тока / А.И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов Транспорт: наука, образование, производство ("Транспорт–2021") Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-н/Д: РГУПС, 2021. – С. 75–78.

15 **Осипова, А. И.** Особенности организации альтернативной схемы заземления опор контактной сети постоянного тока /А.И. Осипова, В.А. Осипов //Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – С. 45–47.

16 **Осипова, А. И.** Оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт–2022»). Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. – С. 37–41.

17 **Осипова, А.И.** Дополнительное заземление опор контактной сети постоянного тока на металлическую оболочку волоконно-оптических линий связи/ А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава», 2022. – № 4 (61). – С. 157–162. ISSN: 1818-5509.

18 **Осипова, А.И.** Варианты организации волоконно-оптических линий связи на электрифицированных железных дорогах /А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции

"Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2023. – С. 47–50.

19 **Осипова, А.И.** Предполагаемые капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока на металлическую оболочку ВОЛС // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции "Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи". – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2023. – С. 100–103.

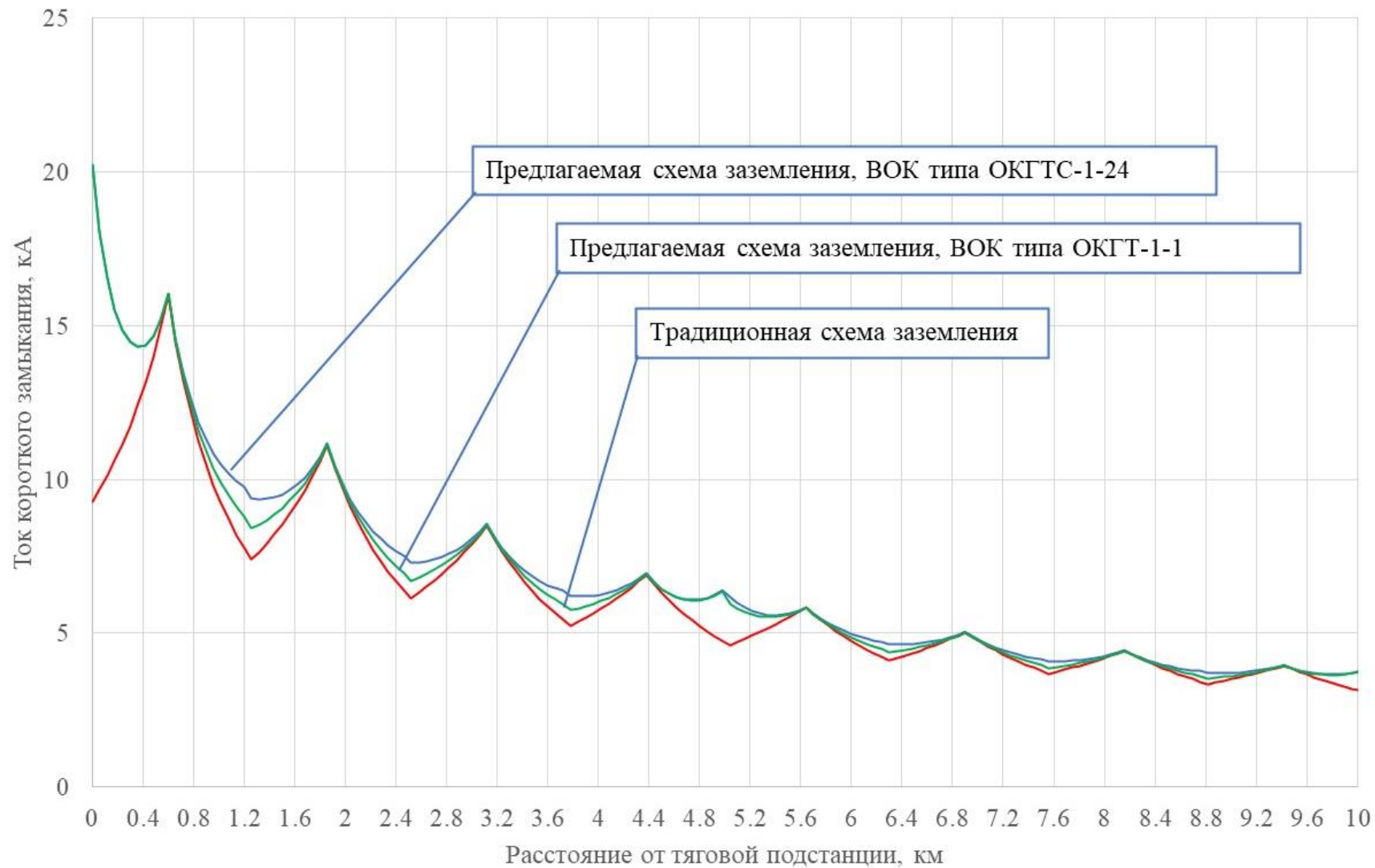


Рисунок А.1 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100, трос группового заземления ПБСМ2–70, одностороннее питание

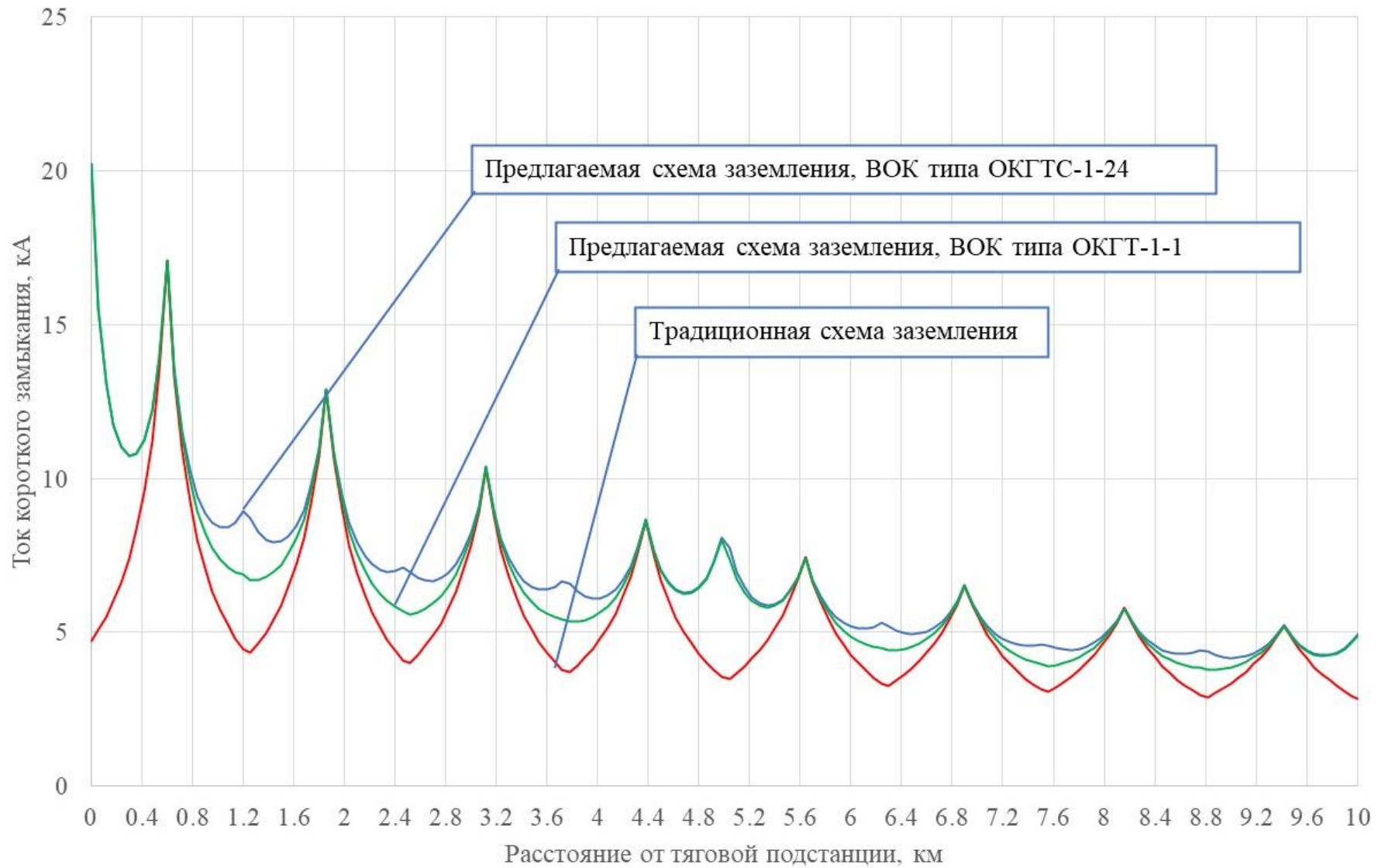


Рисунок А.2 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100+2А185, трос группового заземления АС–95, одностороннее питание

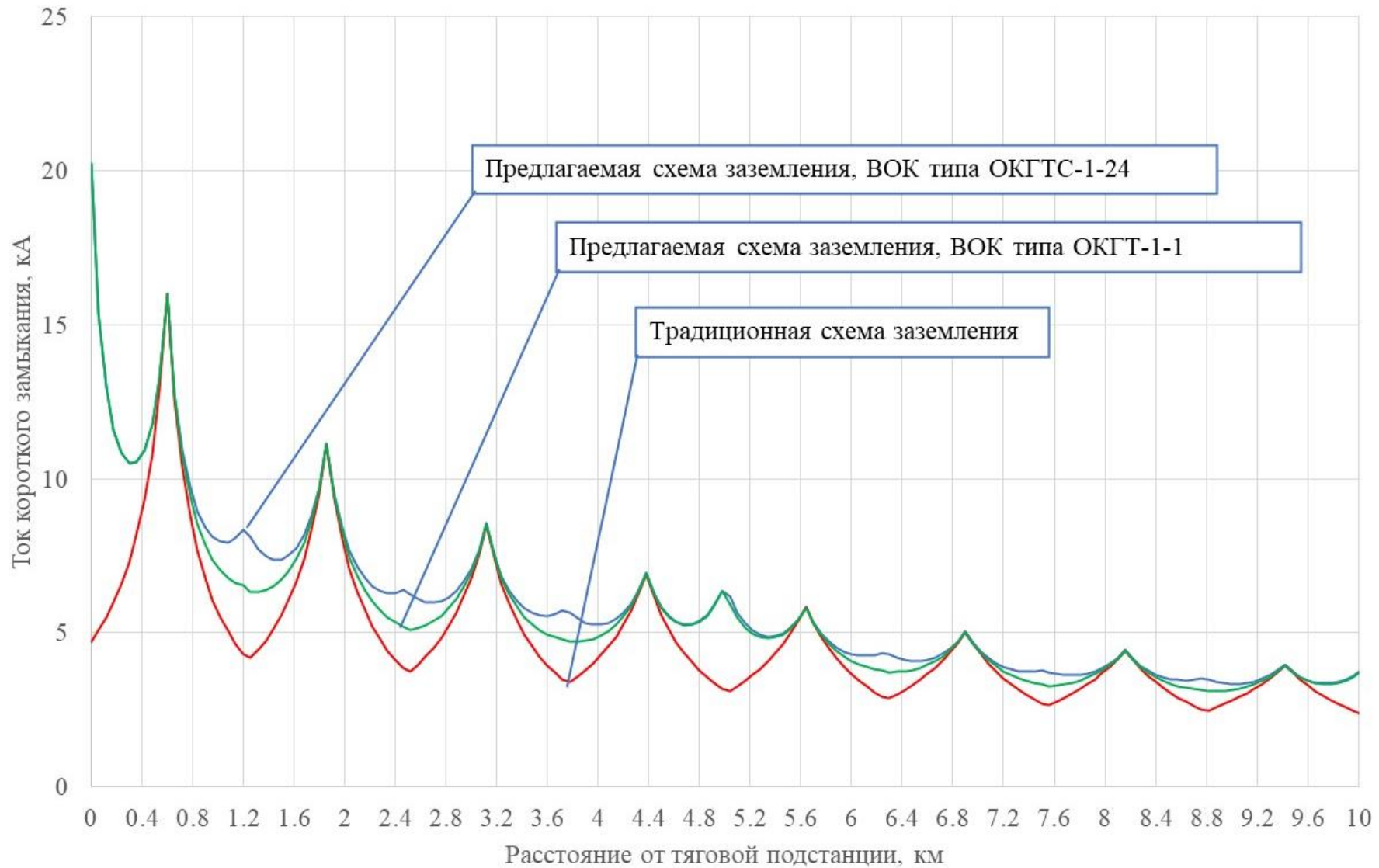


Рисунок А.3 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100+2А185, трос группового заземления ПБСМ2–70, одностороннее питание

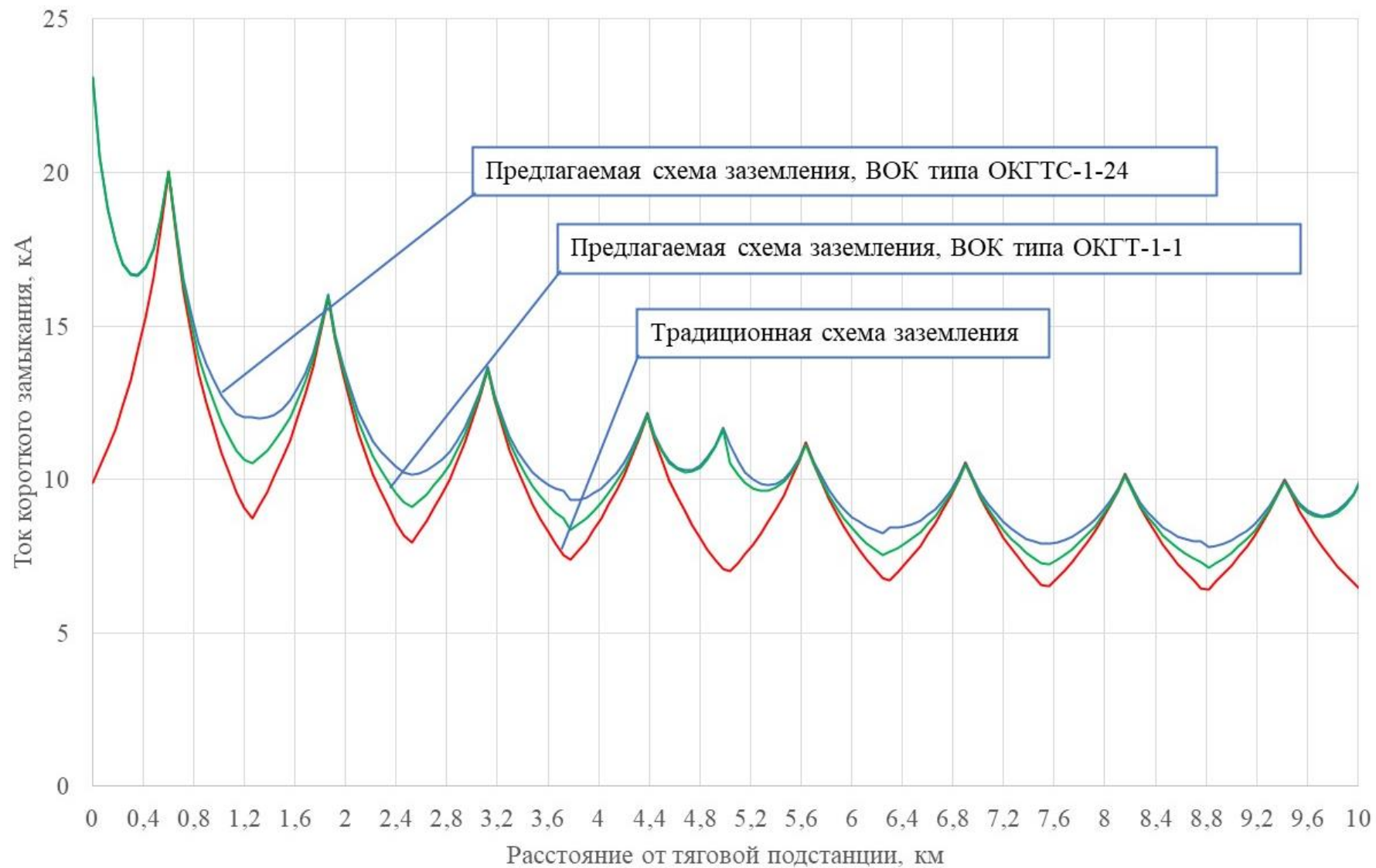


Рисунок А.4 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100+2А185, трос группового заземления АС–95, двустороннее питание

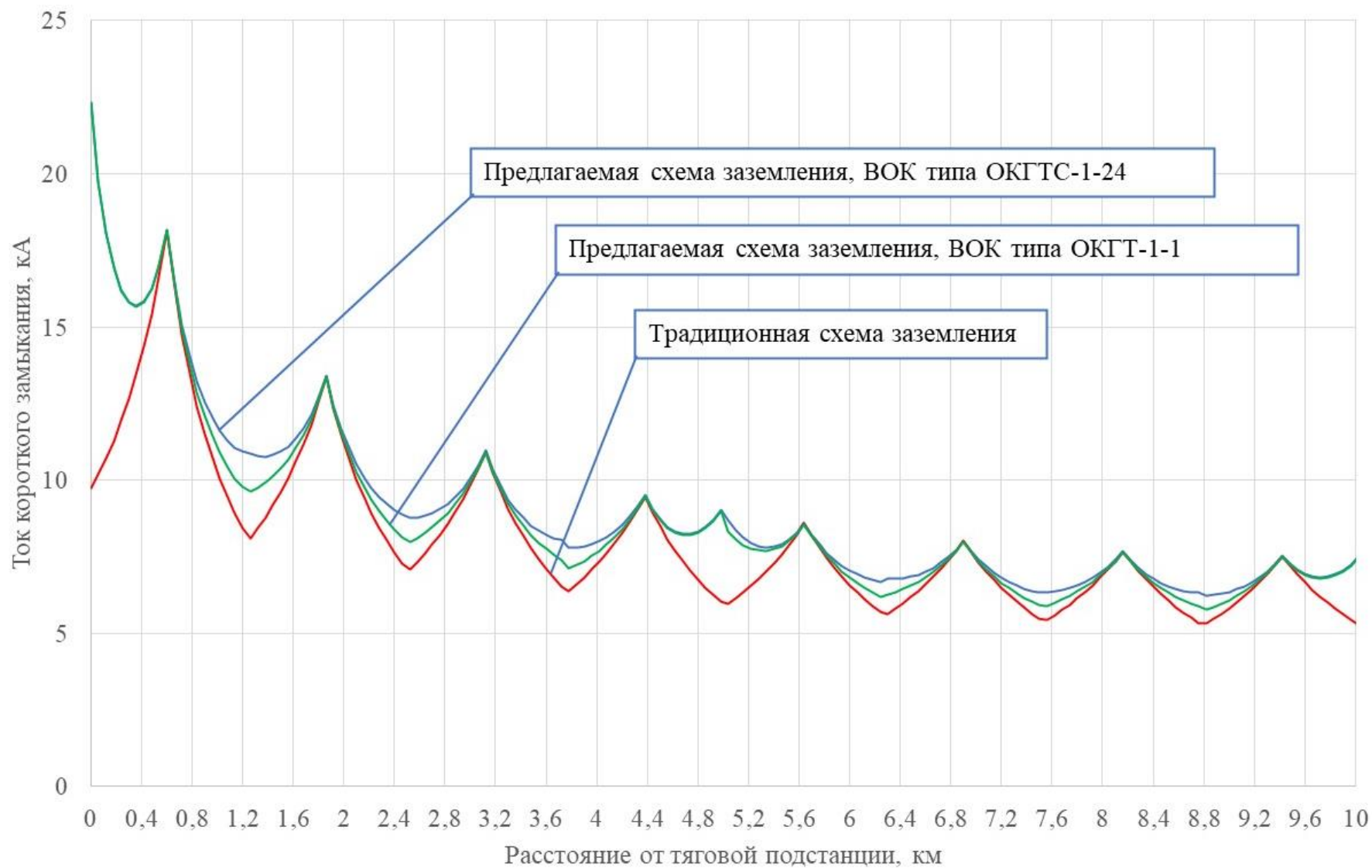


Рисунок А.5 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100, трос группового заземления АС–95, двустороннее питание

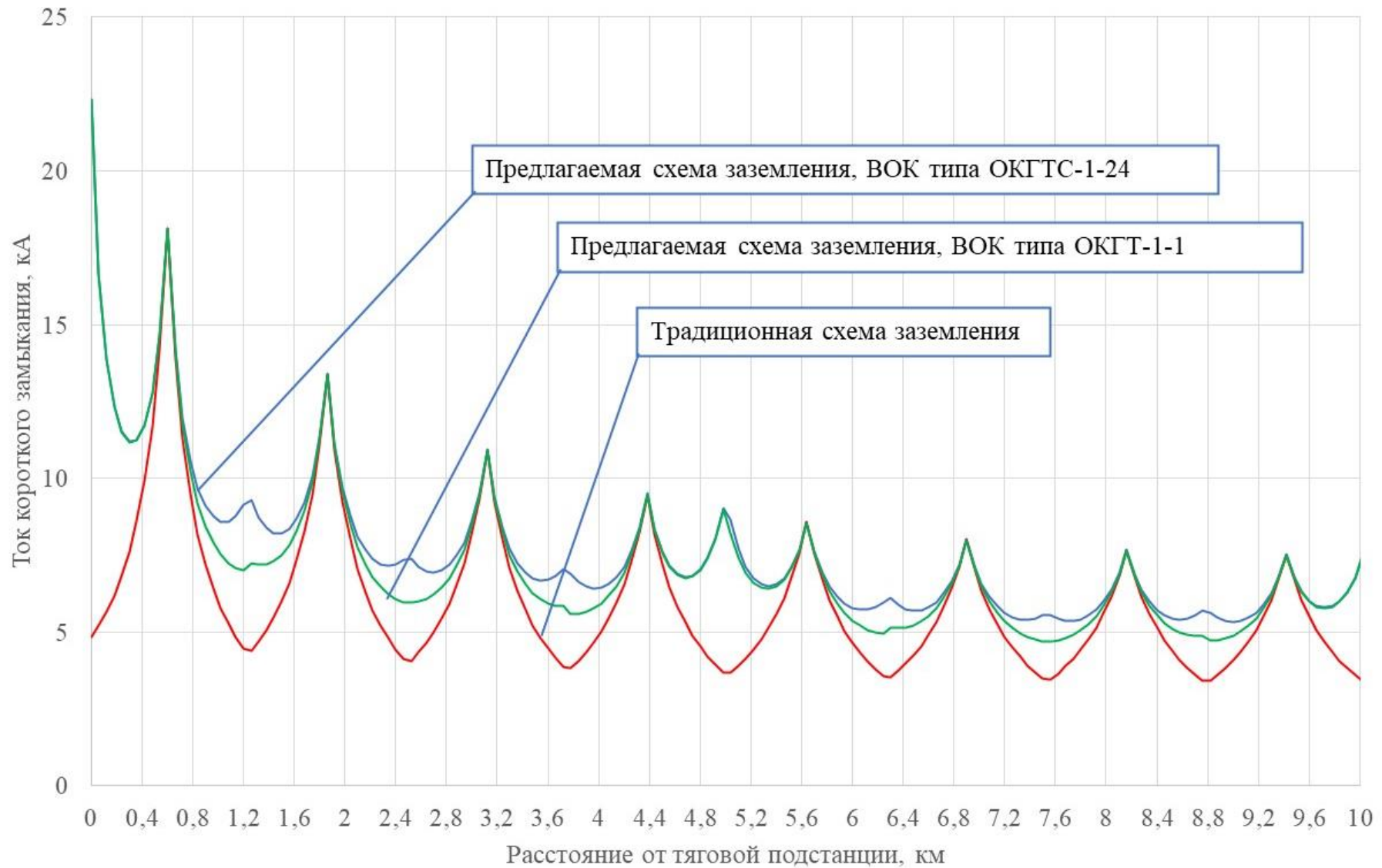


Рисунок А.6 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100, трос группового заземления ПБСМ2–70, двустороннее питание

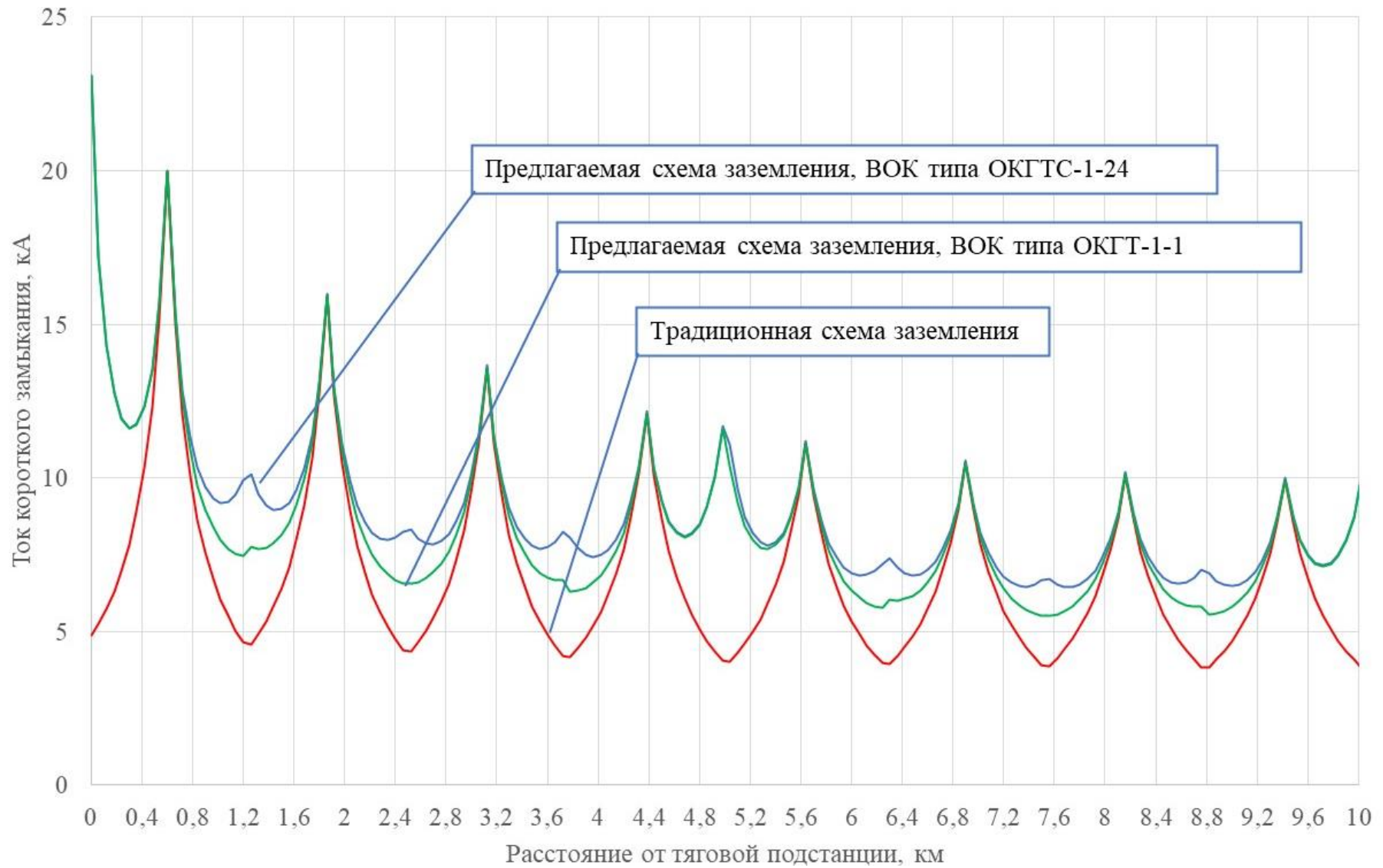


Рисунок А.7 – Зависимость токов короткого замыкания для тяговой сети М120+2МФ100+2А185

трос группового заземления ПБСМ2–70, двустороннее питание

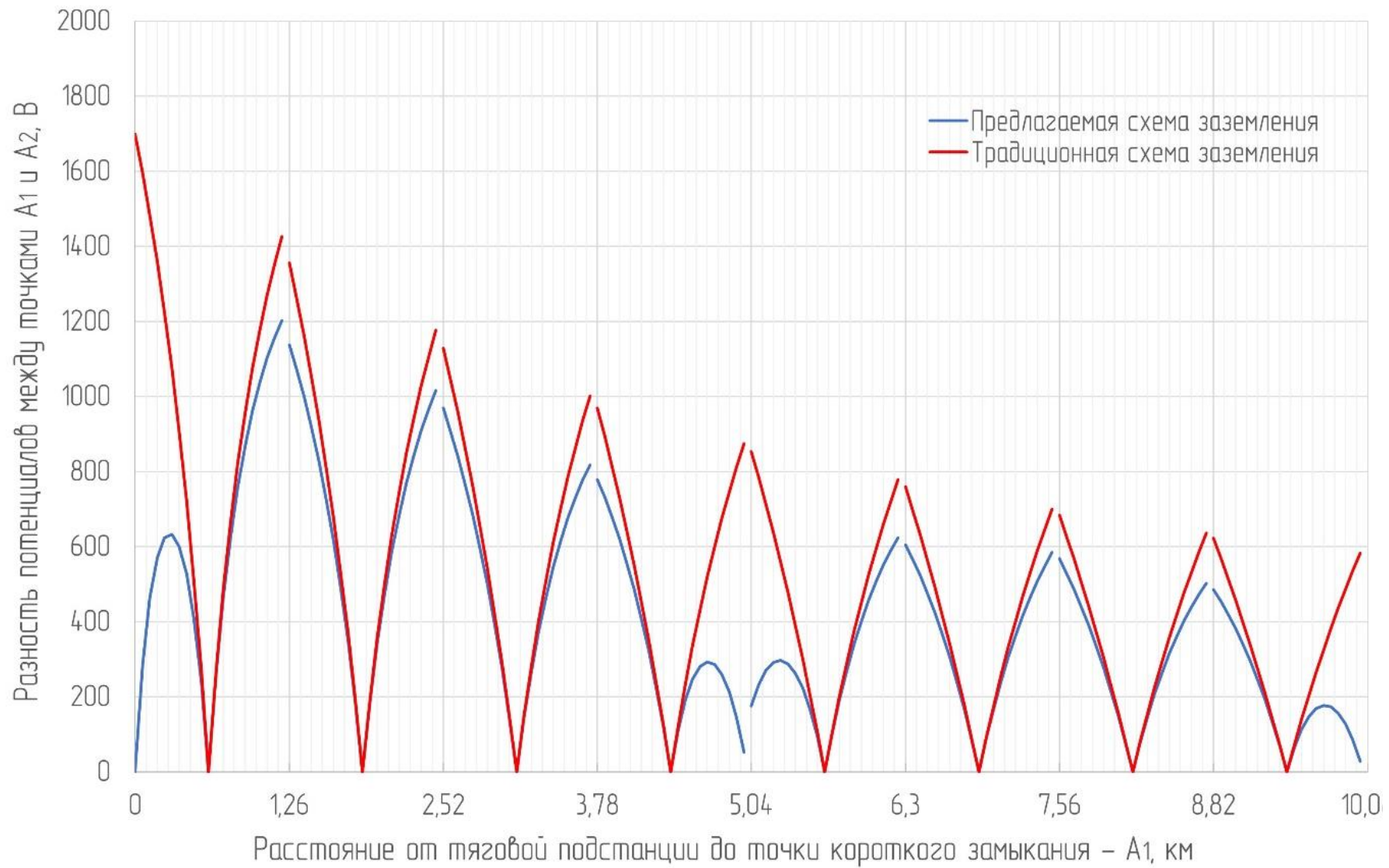


Рисунок Б.1 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100,
 ТГЗ – АС–95, ОКГТ–1–1

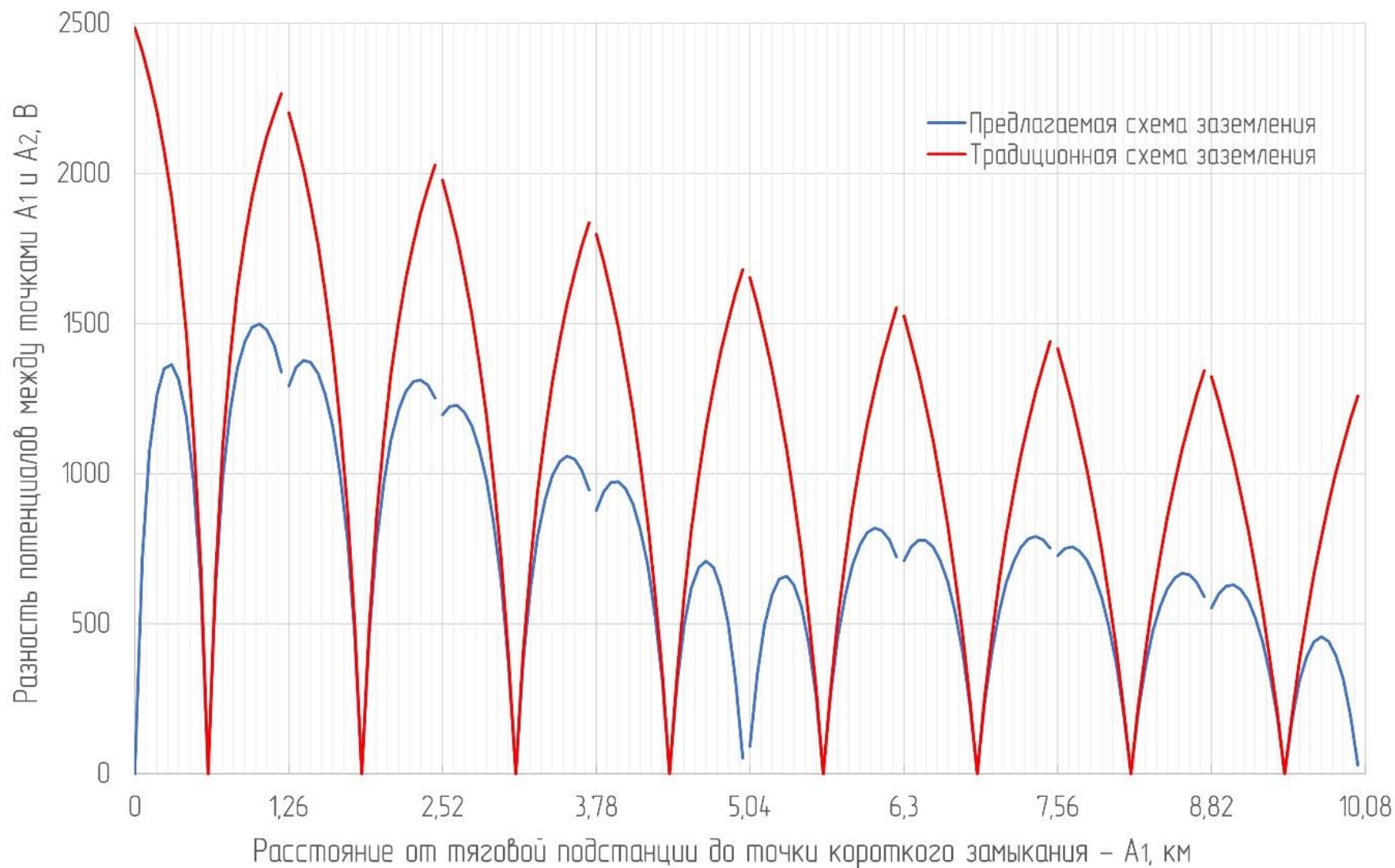


Рисунок Б.2 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100,
ТГЗ – ПБСМ2–70, ОКГТС–1–24

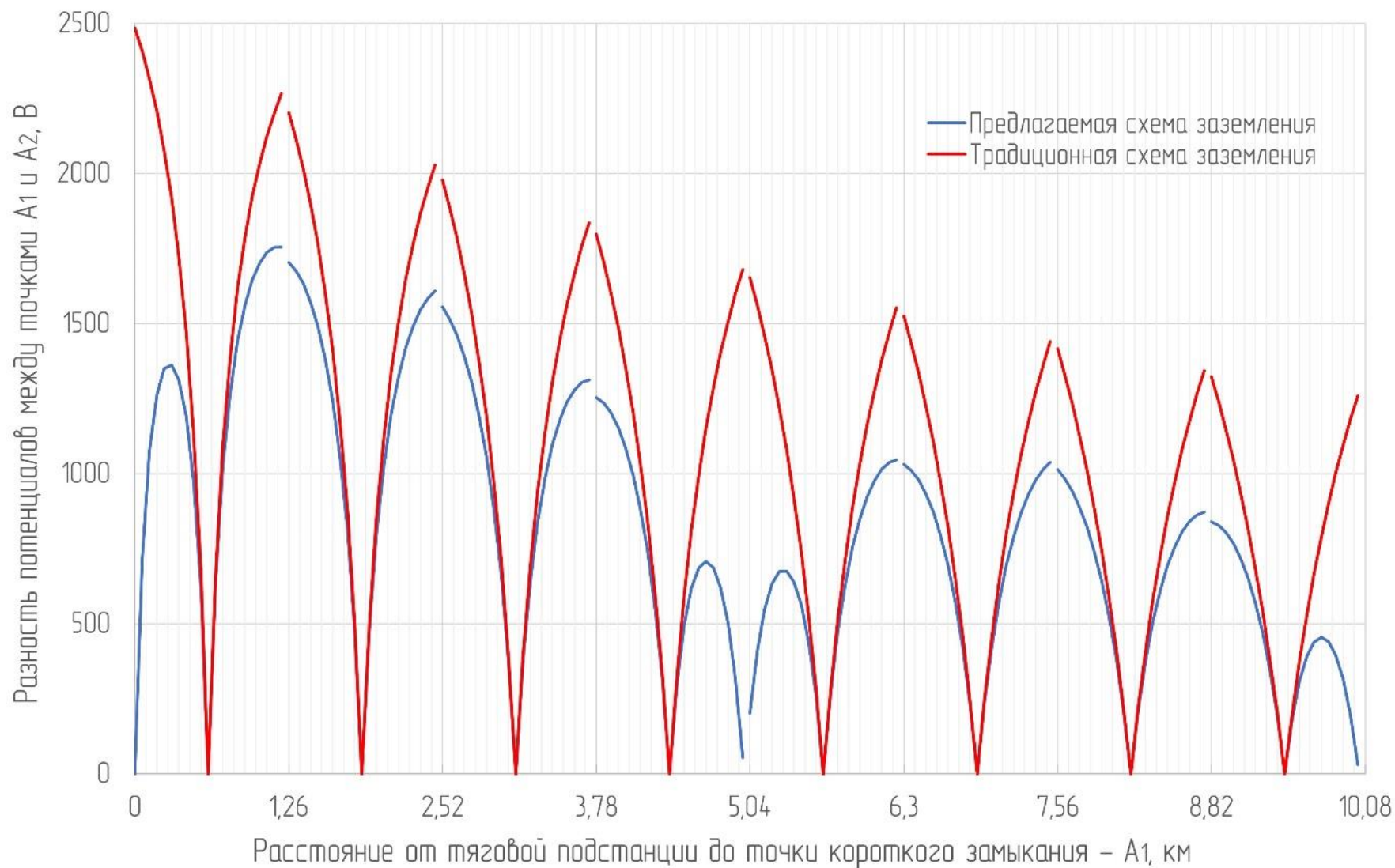


Рисунок Б.3 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – ПБСМ2-70, ОКГТ-1-1

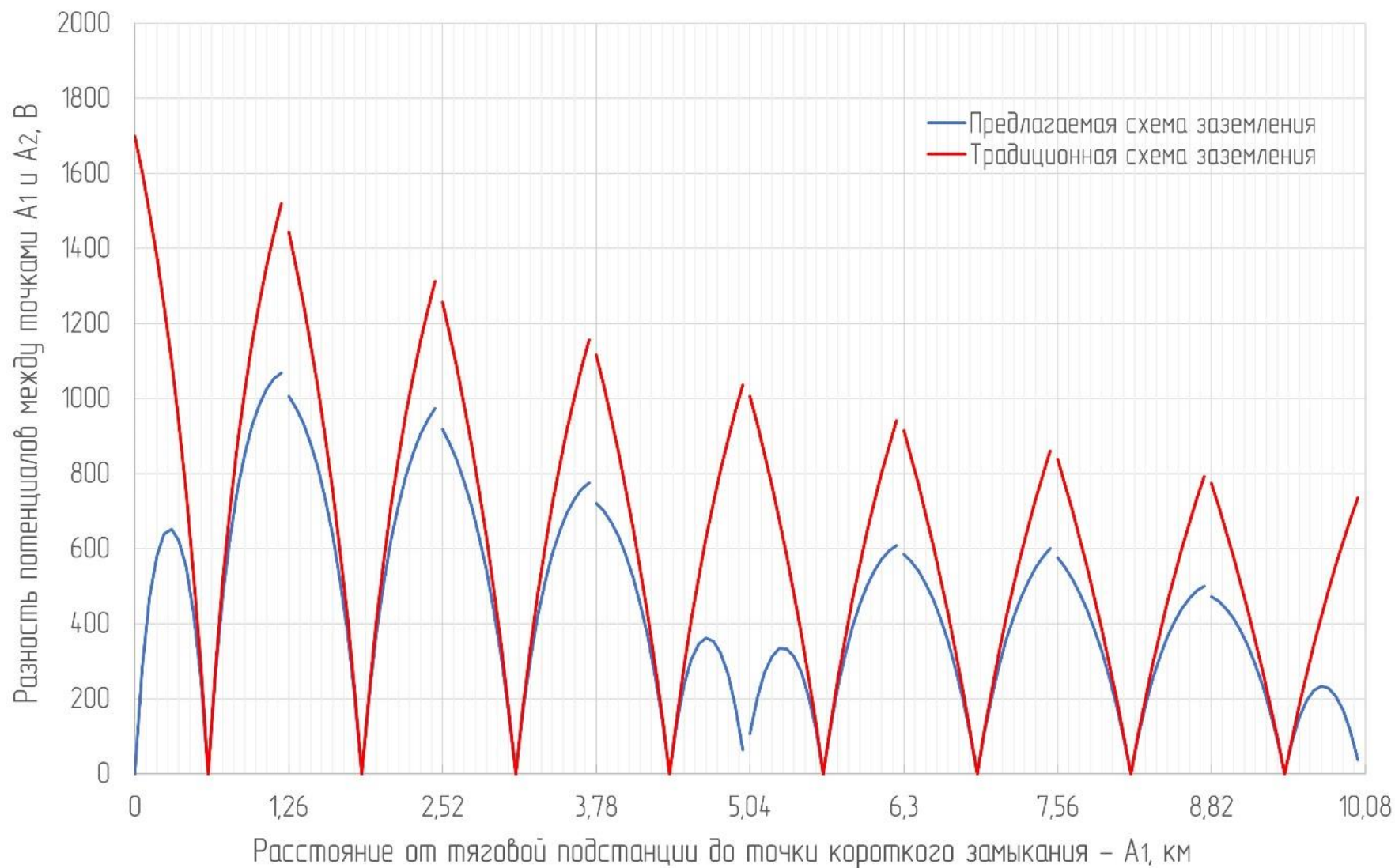


Рисунок Б.4 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185,
ТГЗ – АС-95, ОКГТС-1-24

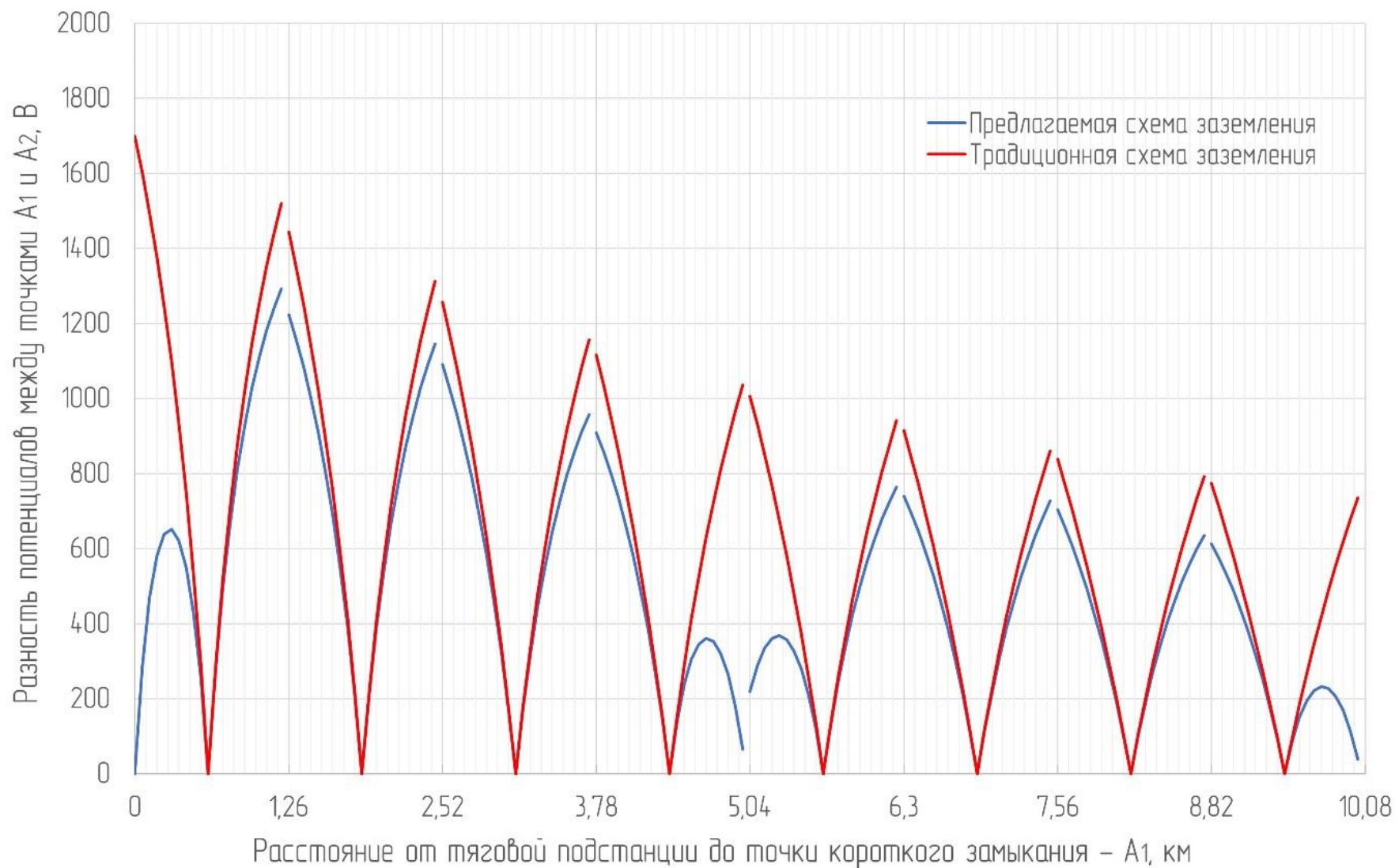


Рисунок Б.5 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185,
ТГЗ – АС-95, ВОЛС – ОКГТ-1-1

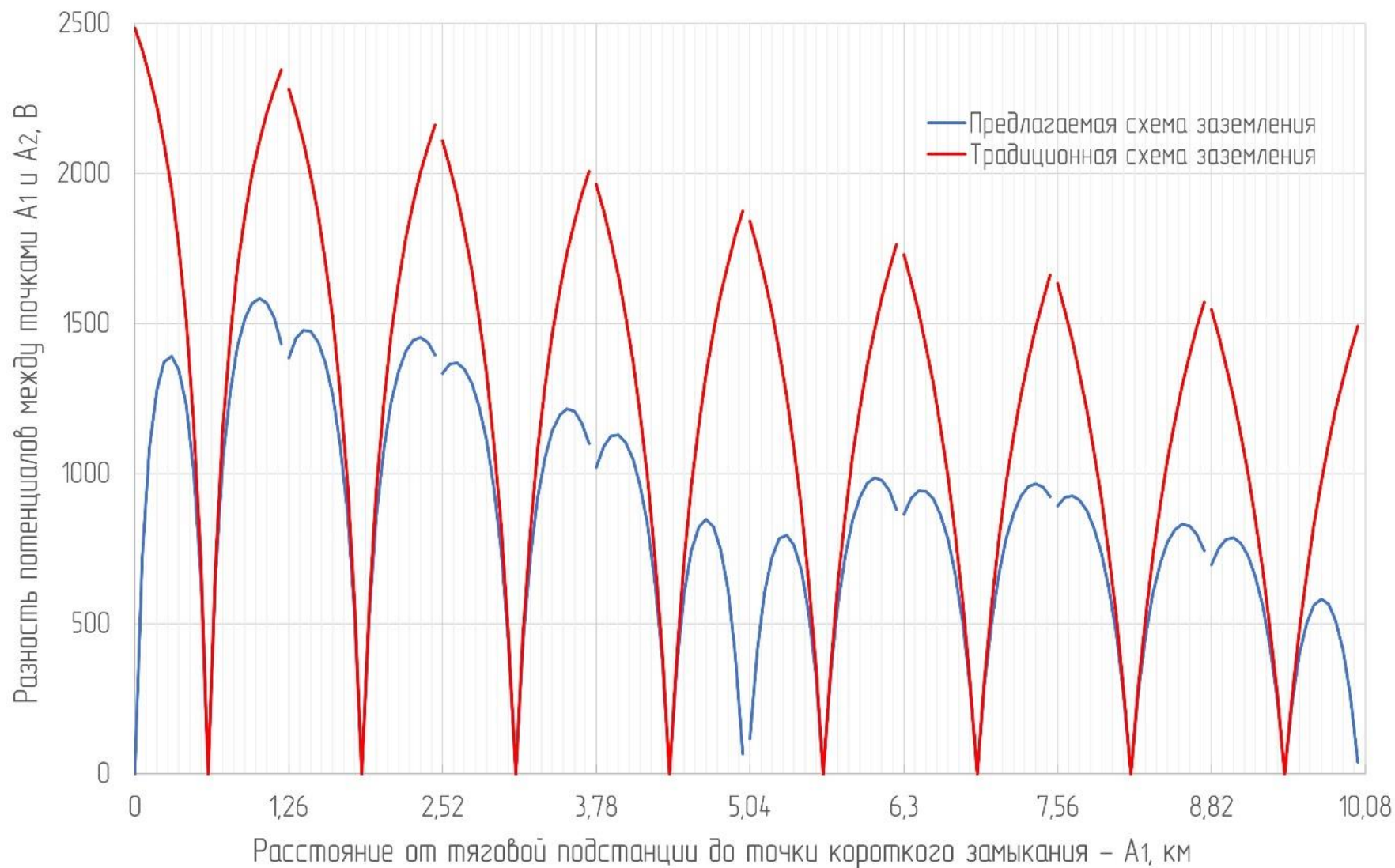


Рисунок Б.6 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185,
ТГЗ – ПБСМ2-70, ВОЛС – ОКГТС-1-24

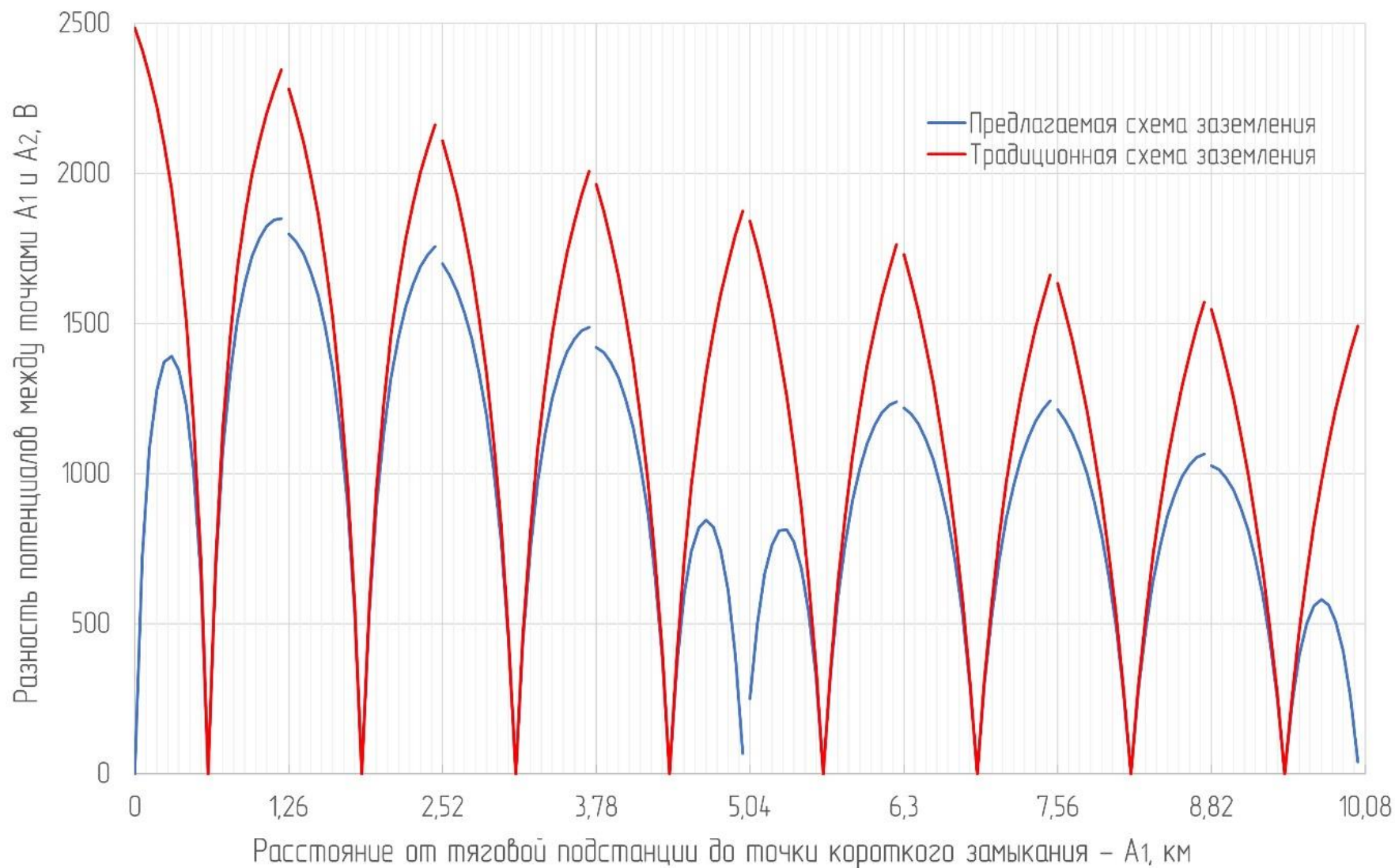


Рисунок Б.7 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – ПБСМ2–70, ВОЛС – ОКГТ–1–1

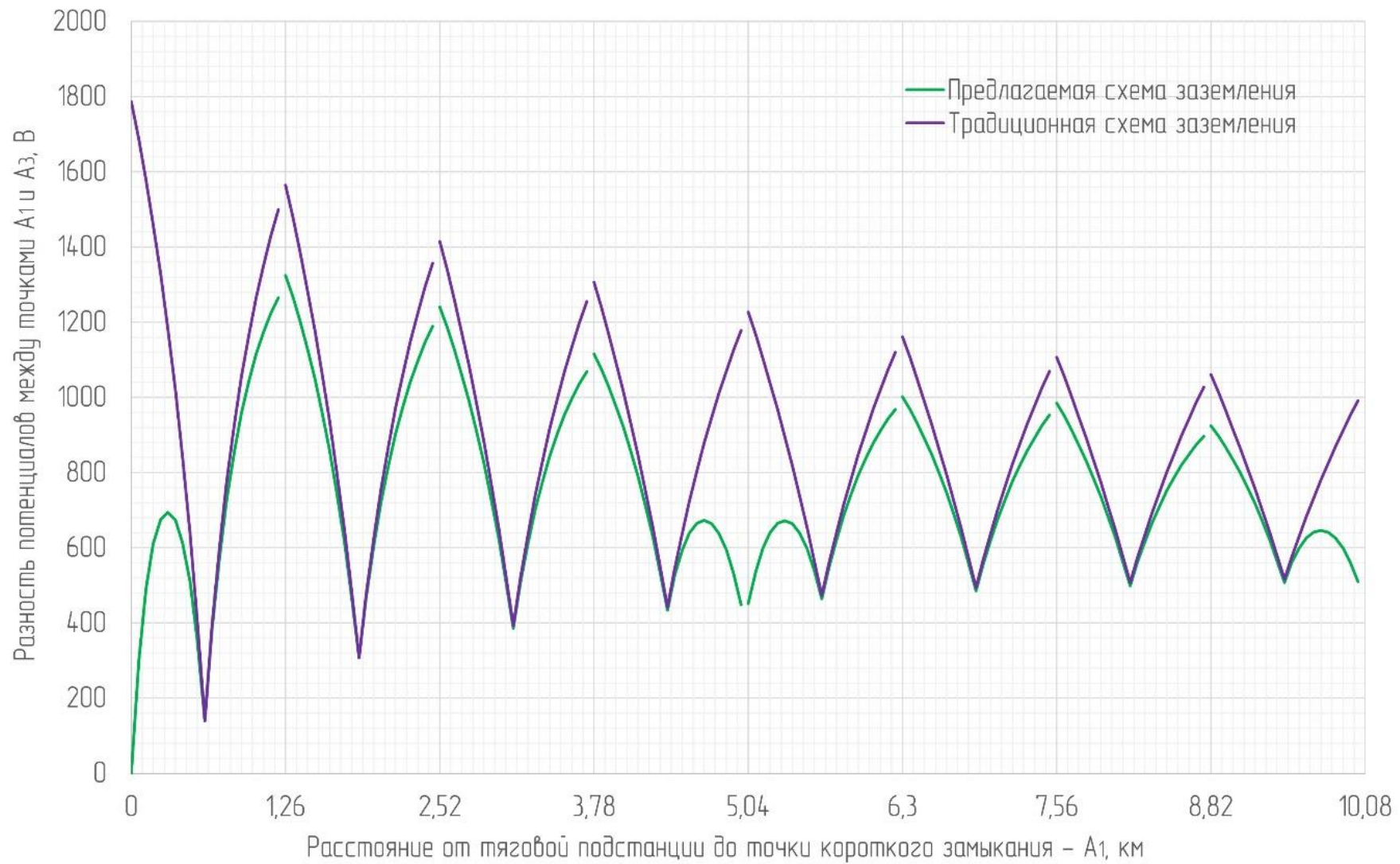


Рисунок В.1 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95,
ВОЛС – ОКГТ–1–1

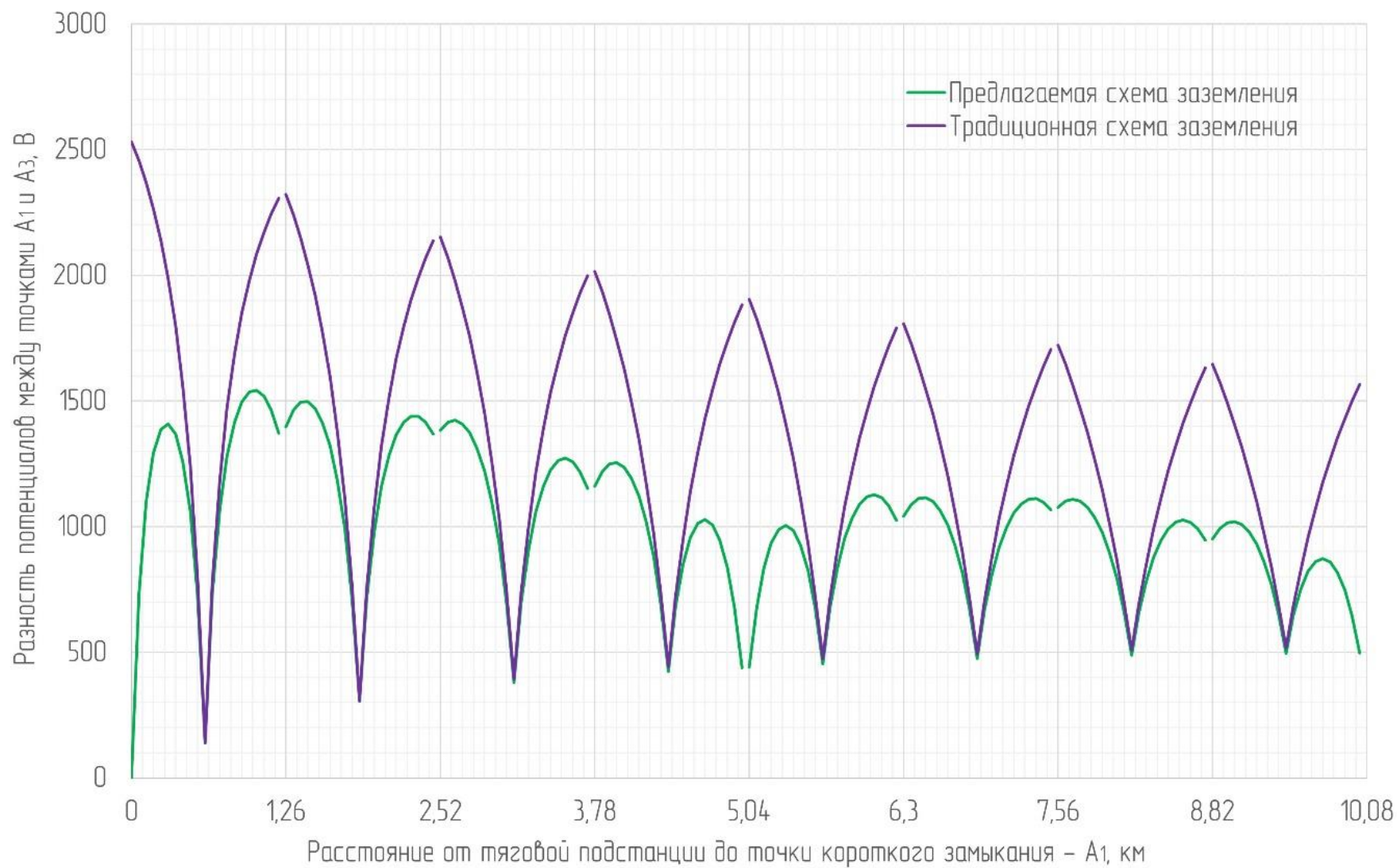


Рисунок В.2 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – ПБСМ2–70, ВОЛС – ОКГТС–1–24

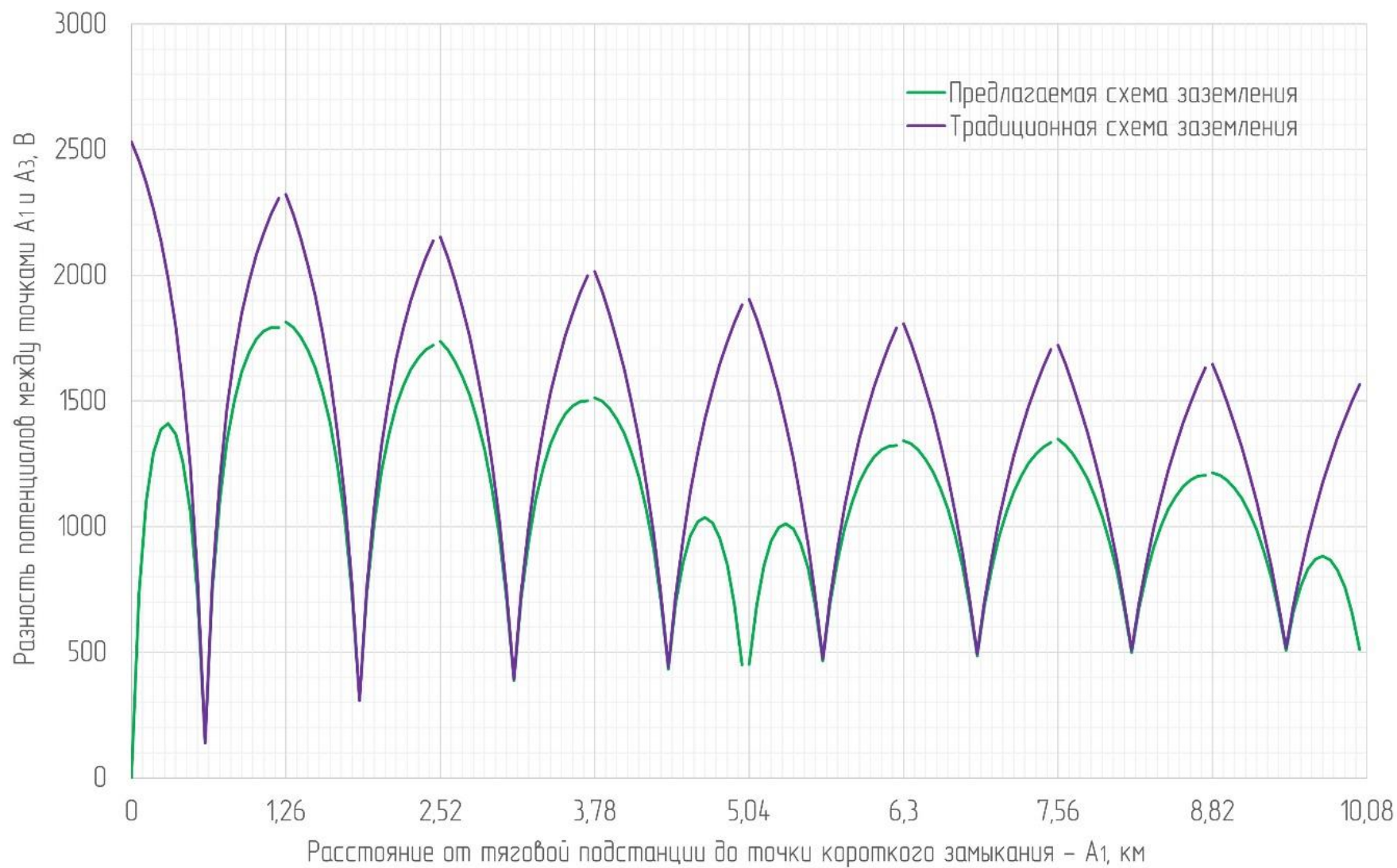


Рисунок В.3 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – ПБСМ2–70, ВОЛС – ОКГТ–1–1

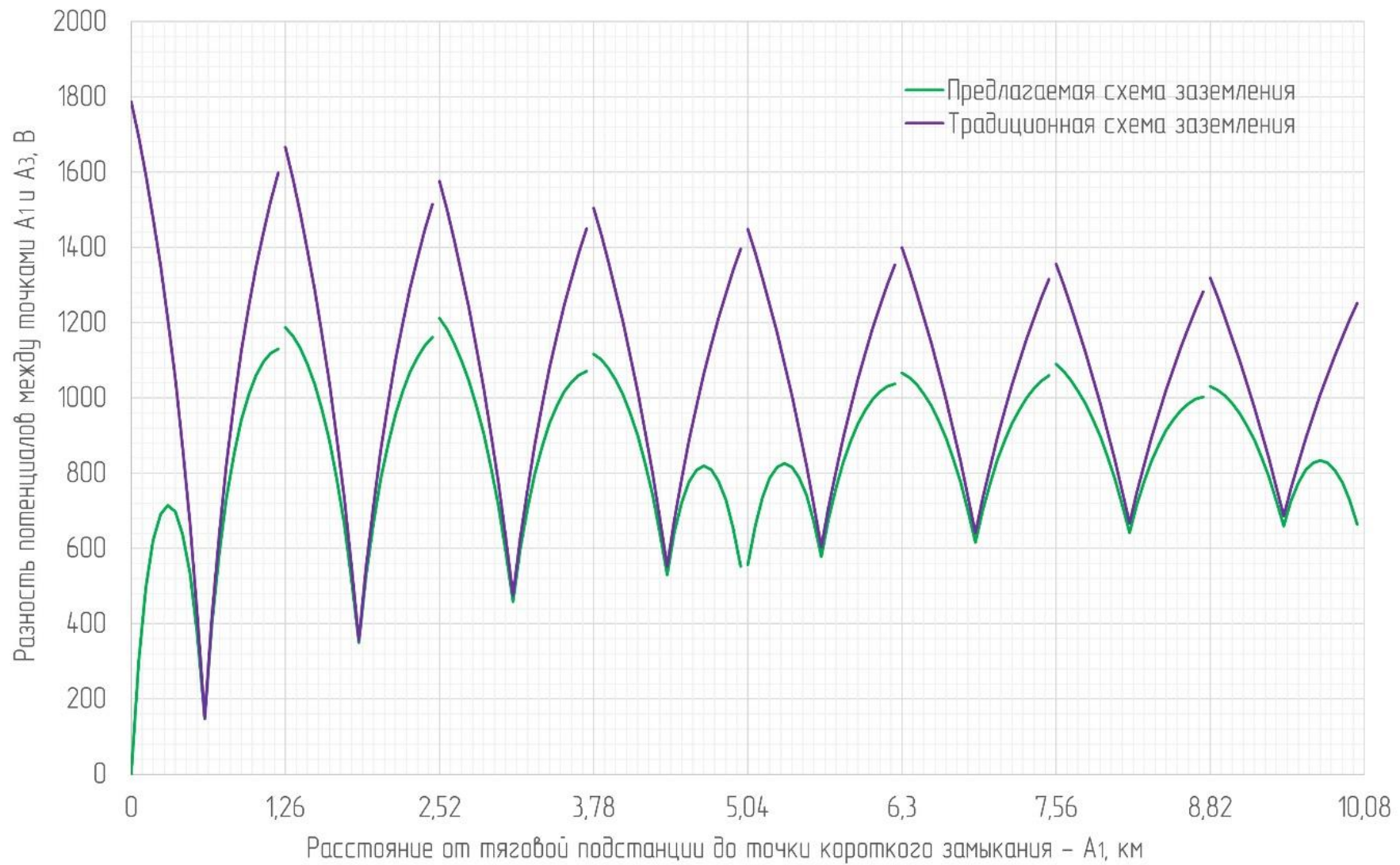


Рисунок В.4 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – АС–95, ВОЛС – ОКГТС–1–24

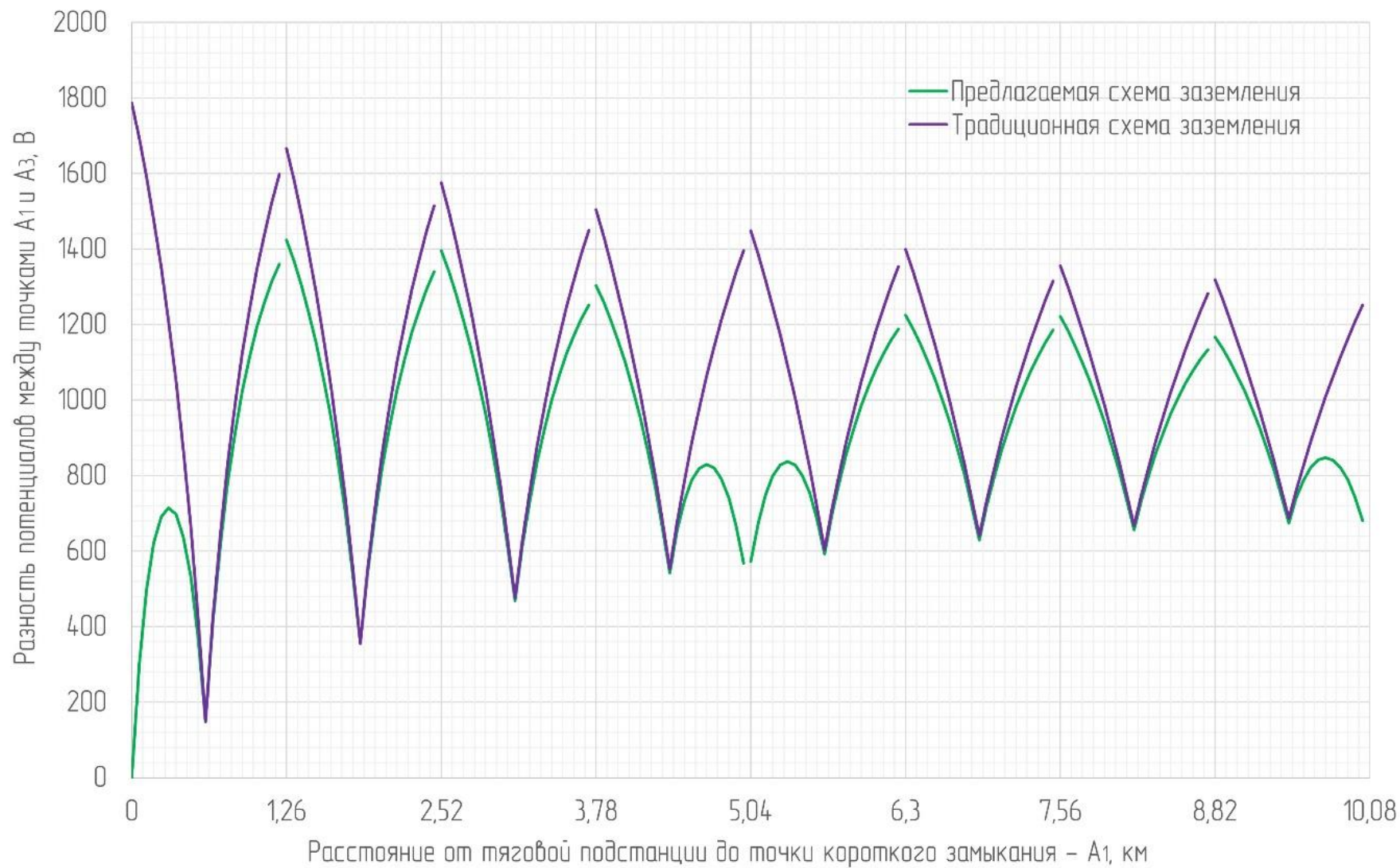


Рисунок В.5 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – АС-95, ВОЛС – ОКГТ-1-1

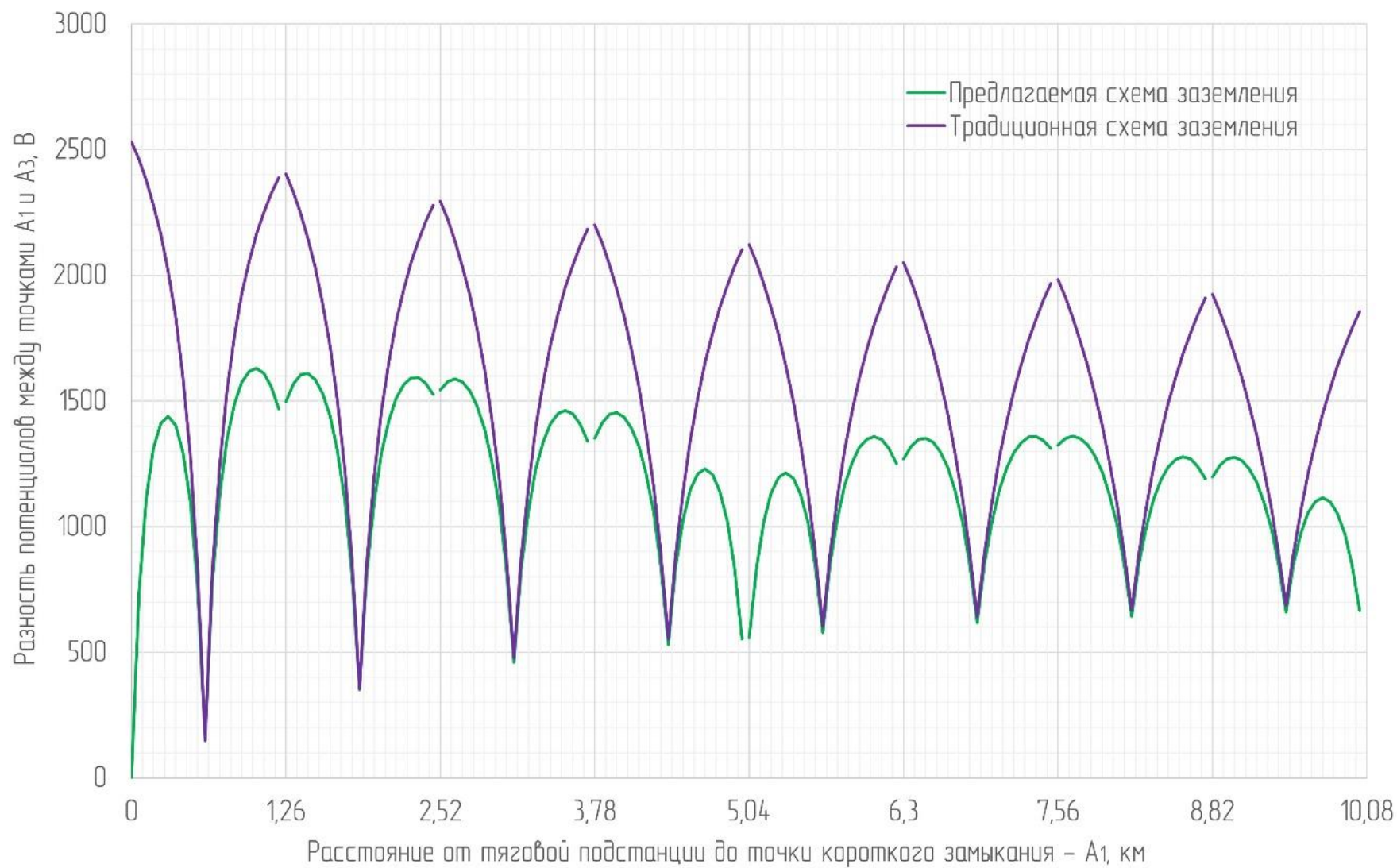


Рисунок В.6 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – ПБСМ2–70, ВОЛС – ОКГТС–1–24

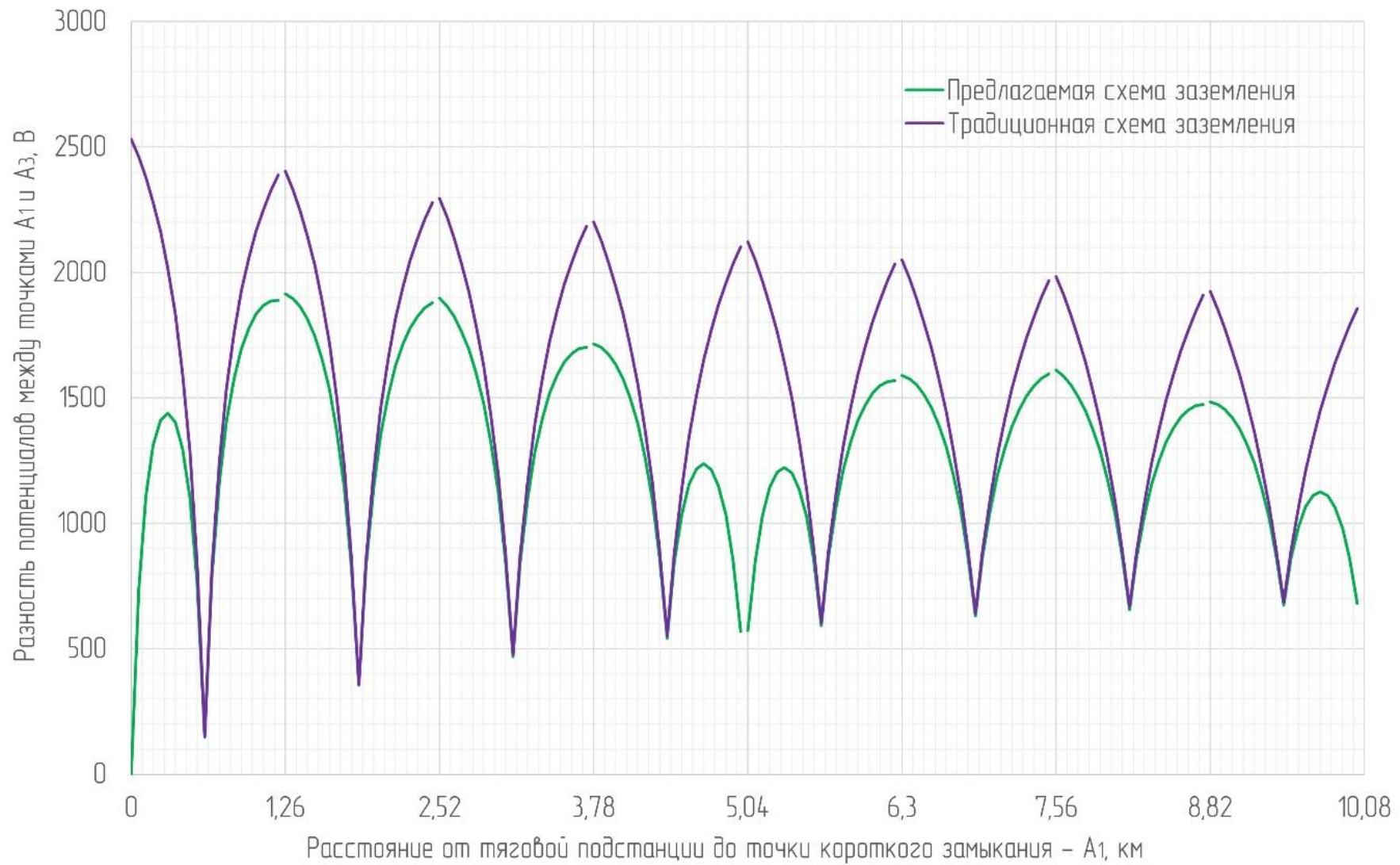


Рисунок В.7 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – ПБСМ2–70, ВОЛС – ОКГТ–1–1

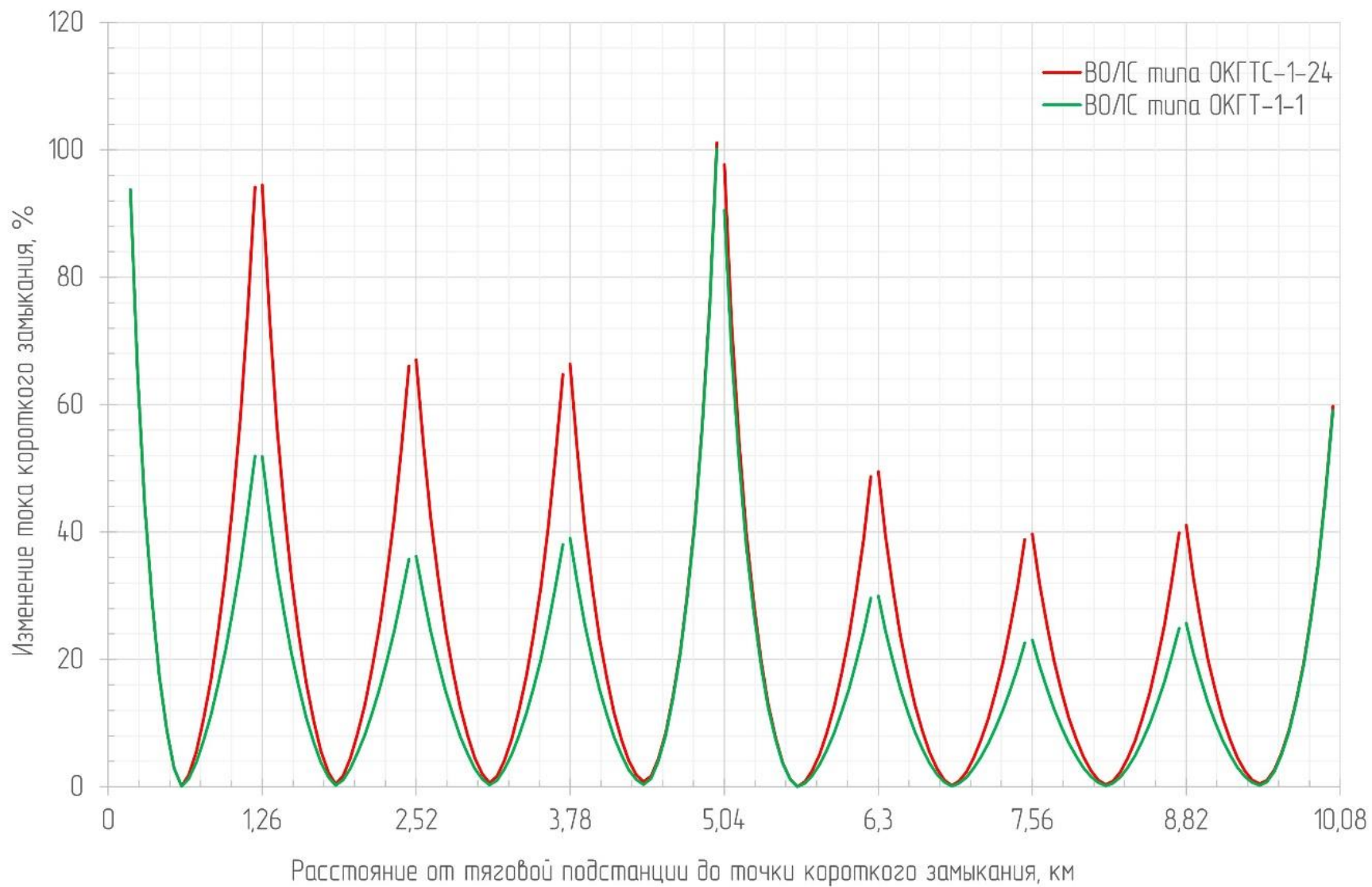


Рисунок Г.1 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – ПБСМ2–70, консольное питание

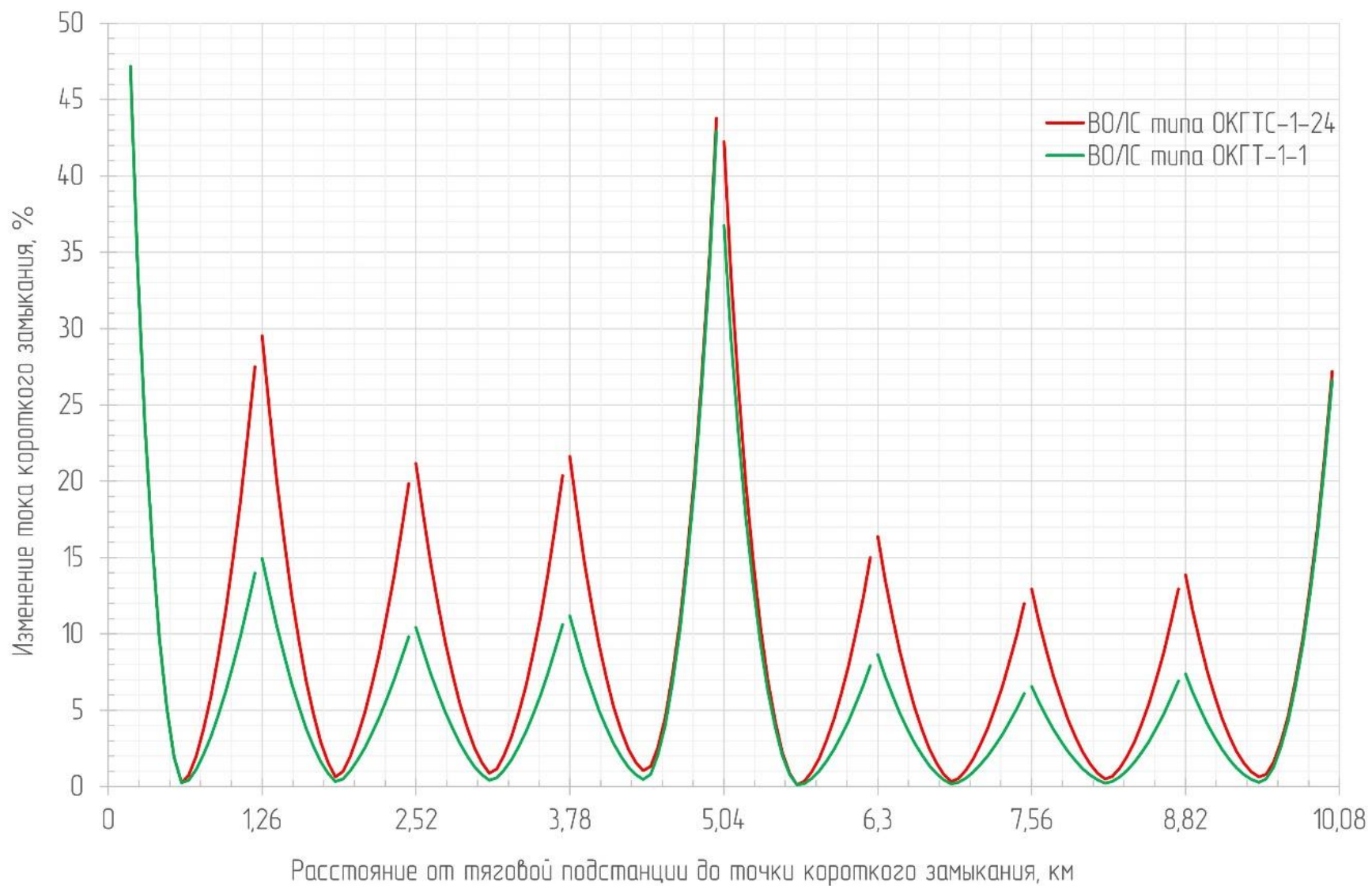


Рисунок Г.2 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – АС-95, консольное питание

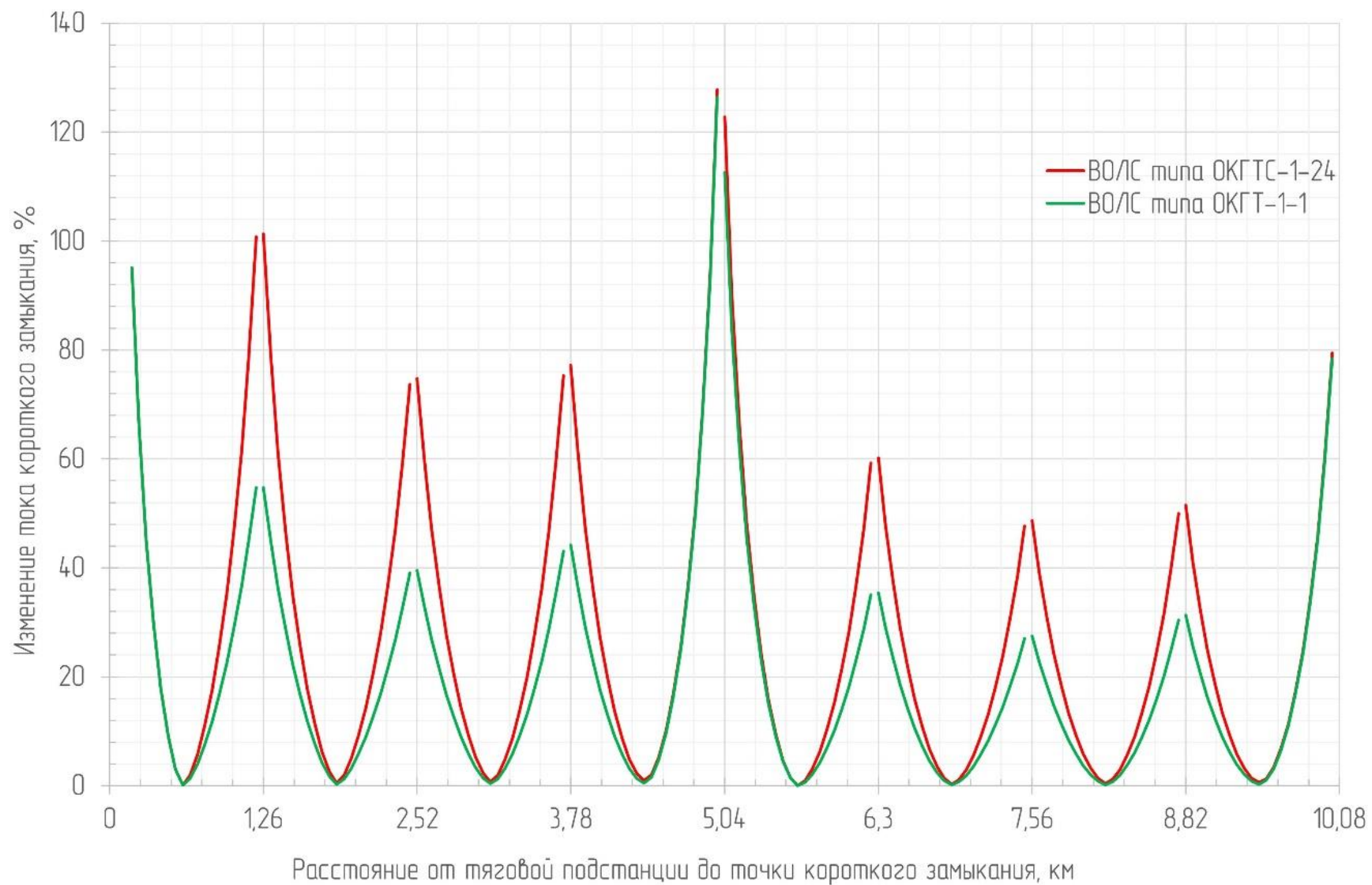


Рисунок Г.3 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – ПБСМ2–70, консольное питание

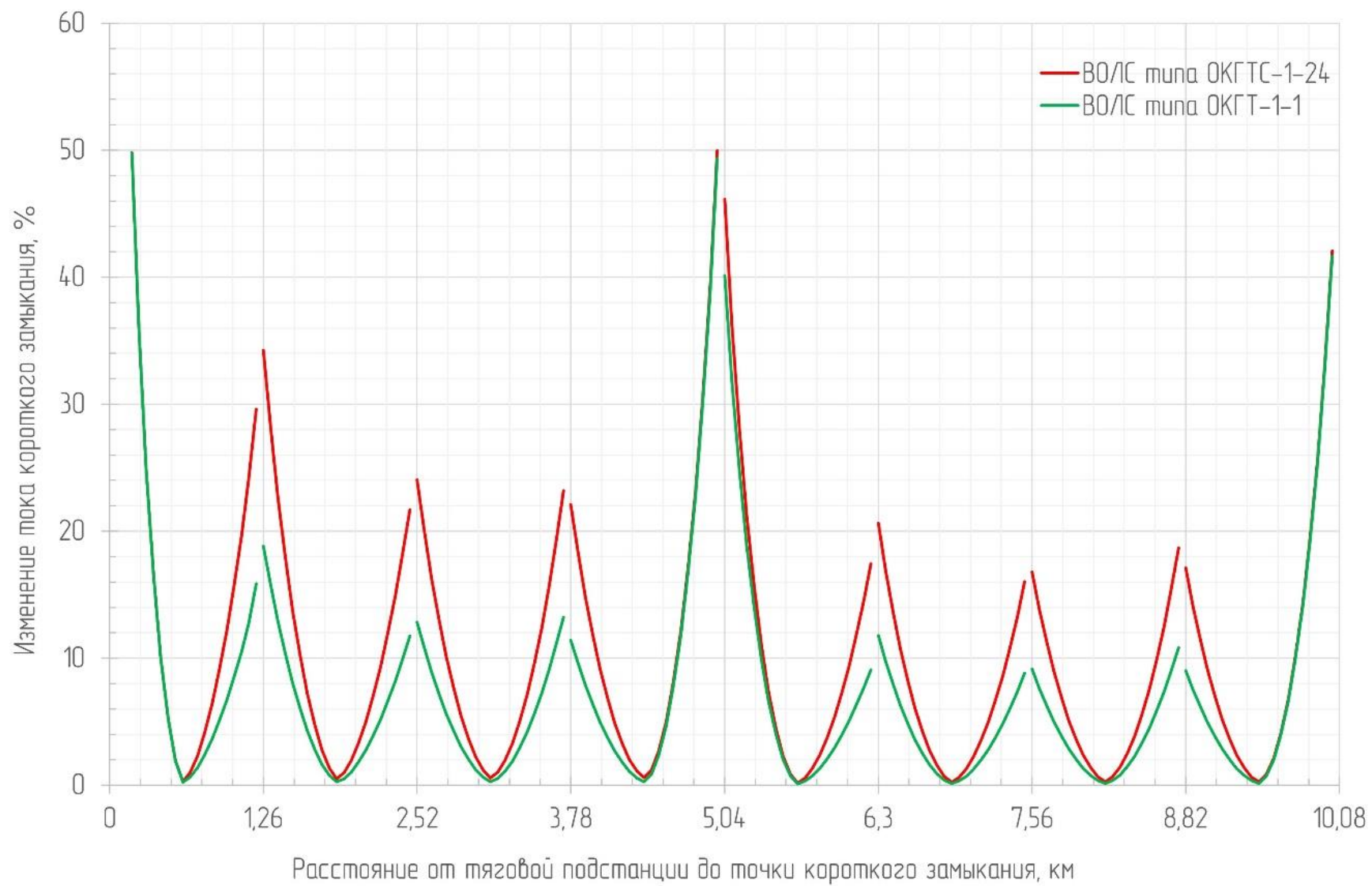


Рисунок Г.4 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС-95, двустороннее питание

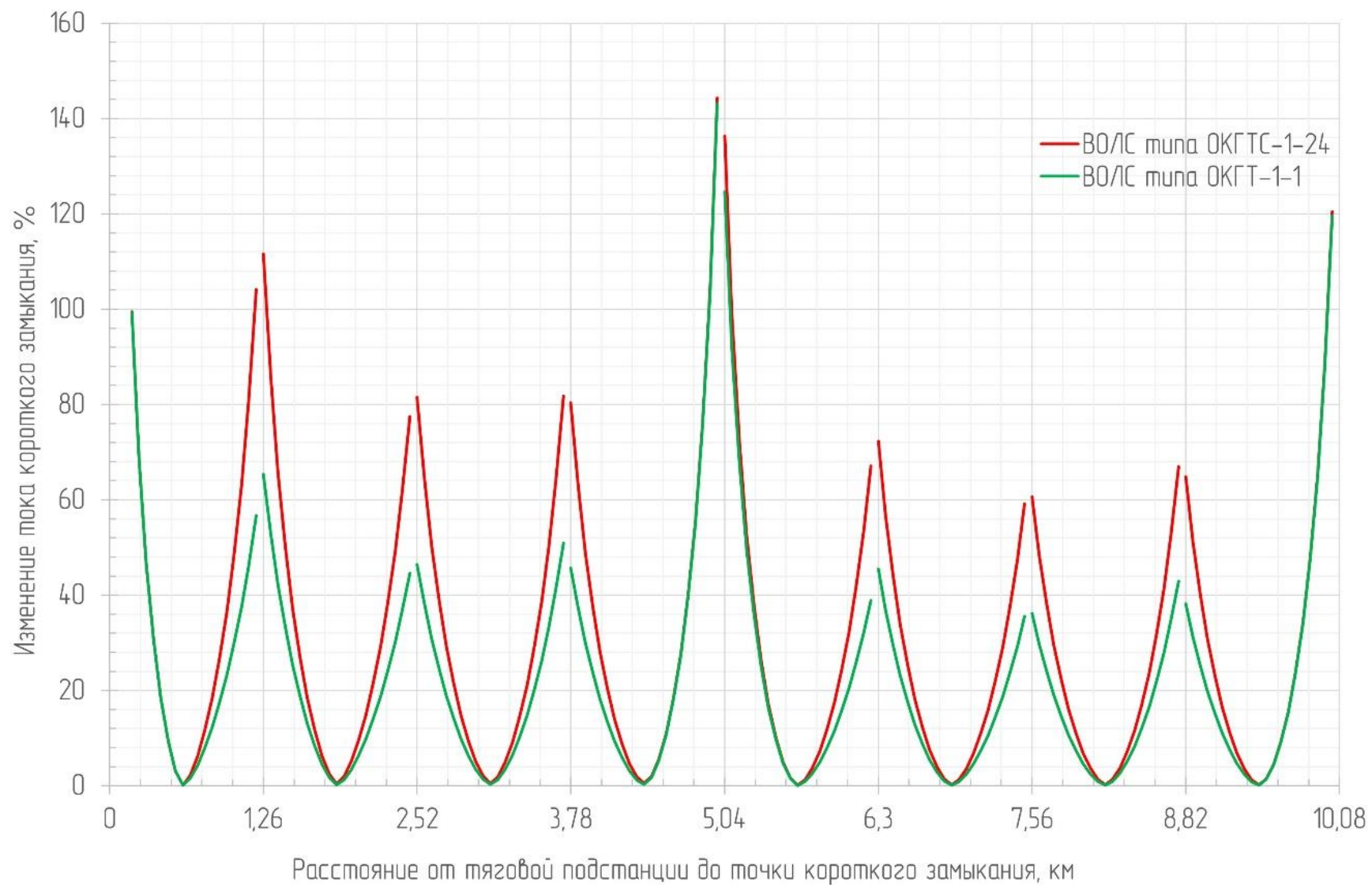


Рисунок Г.5 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – ПБСМ2–70, двустороннее питание

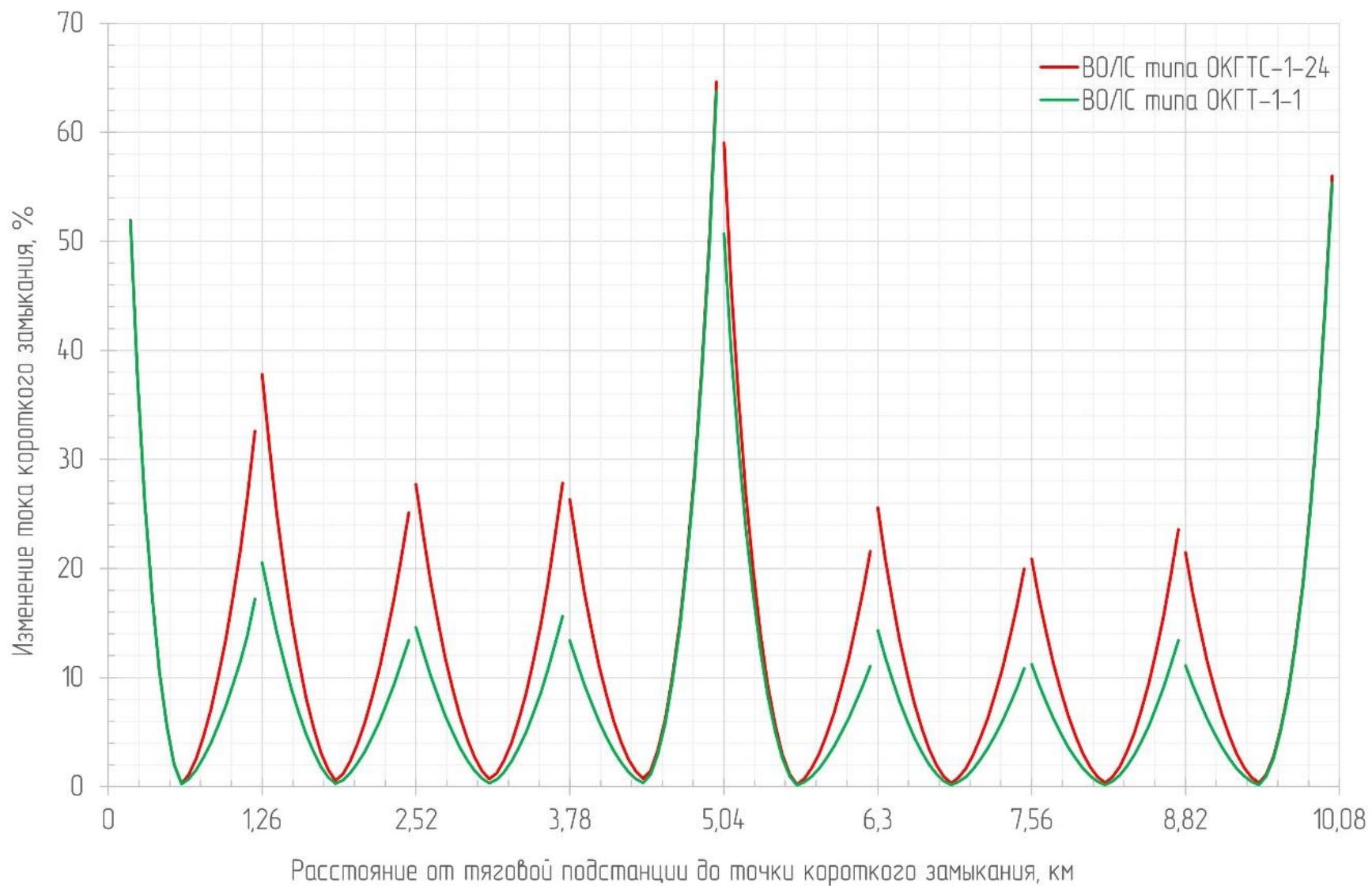


Рисунок Г.6 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – АС-95, двустороннее питание

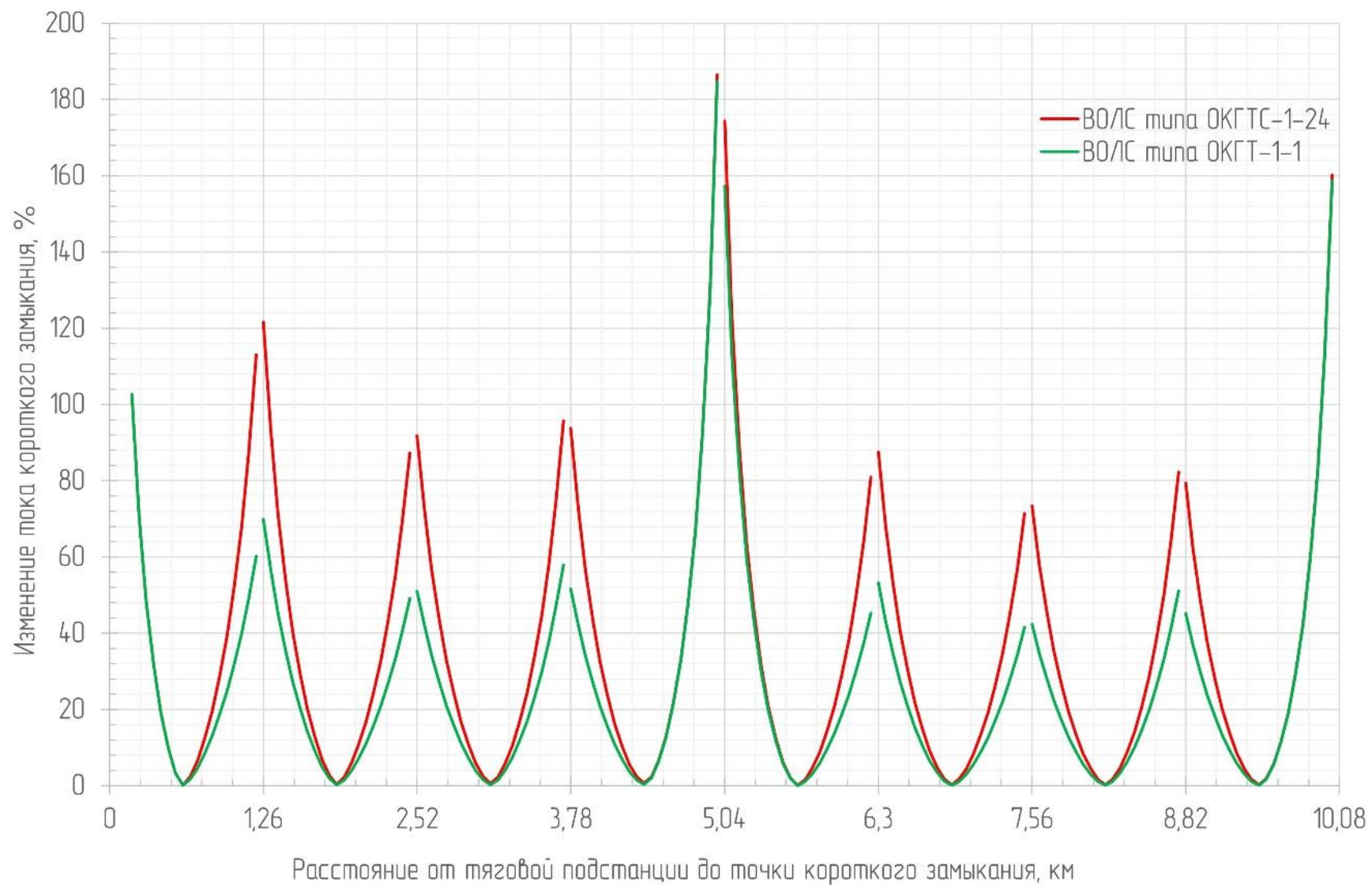


Рисунок Г.7 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100+2А185, ТГЗ – ПБСМ2–70, двустороннее питание

**Приложение Д
Акты внедрения**



ФИЛИАЛ АО «РОСЖЕЛДОРПРОЕКТ»
Ростовский проектно-исследовательский институт
«КАВЖЕЛДОРПРОЕКТ»

Булениновский пр., 25,
Ростов-на-Дону, 344082
тел.: (863) 204 15 10
факс: (863) 269 76 61
e-mail: kavzdr@tzdr.ru
www.tzdr.ru

АКТ

о практической значимости результатов диссертационной работы

**«Повышение эффективности системы заземления опор контактной сети
железных дорог постоянного тока на основе интеграции с волоконно-**

оптической линией связи» на соискание учёной степени кандидата технических

наук

Осиповой Анны Ивановны

Комиссия, рассмотрев результаты диссертационной работы А. И. Осиповой, составила настоящий акт о том, что автором разработаны практические рекомендации, позволяющие:

- 1 Повысить чувствительность релейной защиты к удалённым коротким замыканиям в тяговой сети электрифицированных железных дорог постоянного тока за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания.
- 2 Снизить напряжение прикосновения к опорам контактной сети постоянного тока, возникающее при КЗ, что повышает безопасность людей в зоне группового заземления опор.
- 3 Повысить надёжность отключения КЗ при обрыве троса группового заземления за счёт его дублирования металлической оболочкой ВОЛС.

Результаты научных исследований имеют практическую значимость для повышения эффективности работы системы группового заземления опор контактной сети и релейной защиты на участках железных дорог постоянного тока.

Главный инженер филиала

Ю.О.Фиксель





РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Ил. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: ur.del@rgups.ru
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор,
к.фил.н., доцент

М.А. Кравченко

« 30 » _____ 05 _____ 2023 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации
«Повышение эффективности системы заземления опор контактной
сети железных дорог постоянного тока на основе интеграции
с волоконно-оптической линией связи»
в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС
Осиповой Анны Ивановны

Комиссия в составе: председатель – проректор по научной работе, д.т.н. А.Н. Гуда; начальник учебно-методического управления к.ю.н., доцент Е.И. Мироненко; декан Энергетического факультета д.т.н., профессор В.А. Финоченко; зав. кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения», к.т.н., доцент Т.А. Зарупка составили настоящий акт о том, что основные результаты кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Осиповой Анны Ивановны используются в учебном процессе по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», специализации № 1 «Электроснабжение железных дорог» во время практических и лабораторных занятий, а также для самостоятельной работы студентов, реального курсового и дипломного проектирования.

Основные научные положения диссертации были апробированы в рамках решения учебно-методических вопросов на кафедре АСЭЛ и нашли свое отражение в опубликованных учебных пособиях:

1. Осипова, А.И. Безопасность технологических процессов: учебно-методическое пособие / Н.А. Попова, А.И. Осипова: ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – 84 с. – Библиогр. – Текст: электронный.
2. Осипова, А.И. Безопасность технологических процессов: учебно-методическое пособие для практических занятий и самостоятельной работы / Н. А. Попова, О. В. Кубкина, А. И. Осипова и [и др.]: ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. – 20 с. – Библиогр. – Текст: электронный.

Использование учебных пособий повышает качество подготовки специалистов, способствует развитию инженерного мышления и формированию компетенций.


Председатель комиссии,
проректор по научной работе
д.т.н., профессор


_____ А.Н. Гуда

Члены комиссии:
Начальник учебно-методического
управления,
к.ю.н., доцент


_____ Е.И. Мироненко

Декан Энергетического факультета,
д.т.н., профессор


_____ В.А. Финоченко

Зав. кафедрой «Автоматизированные
системы электроснабжения»,
к.т.н., доцент


_____ Т.А. Заручкава