

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Уральский государственный университет путей сообщения»  
(УрГУПС)**

*На правах рукописи*



Лесников Дмитрий Валентинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПОМОЩЬЮ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор технических наук,  
профессор Кузнецов К.Б.

Екатеринбург – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 Анализ систем заземления опор контактной сети и методов расчета заземляющих устройств.....	12
1.1. Особенности работы рельсовой сети электрифицированной железной дороги .....	12
1.2 Теоретические положения, используемые при расчете систем заземления опор контактной сети.....	14
1.3 Анализ отечественных систем заземления опор контактной сети...	22
1.4 Анализ зарубежных систем заземления на железнодорожном транспорте.....	30
1.5 Варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.....	37
Глава 2 Теоретическое исследование распределения потенциалов и токов в системах «рельсы-земля» и «рельсы-протяженный заземлитель»	45
2.1 Исследование электрических параметров опор контактной сети....	45
2.2 Оценка величин переходных сопротивлений и взаимных проводимостей в системе «рельсы-протяженный заземлитель».....	58
2.3 Математическая модель системы «рельсы-земля».....	67
2.4 Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель».....	72
2.5 Развитие математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель».....	80
2.6 Математическая модель системы «рельсы – протяженный заземлитель» при различных вариантах его конструктивного исполнения.....	88
Глава 3 Методы исследования систем «рельсы-земля» и «рельсы-	

	протяженный заземлитель».....	98
3.1	Физическая аналоговая модель участка постоянного тока.....	98
3.2	Моделирование системы «рельсы-земля» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.....	104
3.3	Моделирование системы «рельсы-протяженный заземлитель» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.....	108
3.4	Сравнение аналитического и численного решений с результатами моделирования с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.....	113
Глава 4	Оценка эффективности протяженных заземляющих устройств.....	124
4.1	Методика оценки эффективности.....	124
4.2	Оценка вариантов конструктивного исполнения по критерию потенциального уменьшения интенсивности электрокоррозии .....	130
4.3	Оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения по условиям электробезопасности.....	146
4.4	Оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения по работоспособности токовых защит фидеров тяговых подстанций.....	157
4.5	Технико-экономическое сравнение вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.....	166
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	174
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ А	Результаты расчета переходных сопротивлений и взаимных проводимостей при различных параметрах системы «рельсы-протяженный заземлитель».....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	Зависимости потенциала элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли от координаты для различных вариантов кон-	

	структивного исполнения протяженных заземляющих устройств в нормальном режиме.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ В	Зависимости потенциала элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли от координаты для различных вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств в аварийных режимах.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	Зависимости потенциала элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли от времени для различных вариантов конструктивного исполнения протяженного заземляющего устройства в нормальном режиме.....	209
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	Зависимости потенциала элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли от координаты места замыкания для различных вариантов конструктивного исполнения протяженного заземляющего устройства в режиме короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть нечетного пути...	230
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	Зависимости тока фидеров контактной сети и протяженного заземлителя тяговых подстанций «Сарга» и «Сабик» от времени при пропуске пакетов поездов.....	252
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	Зависимости тока фидеров контактной сети и протяженного заземлителя тяговых подстанций «Сарга» и «Сабик» от координаты места замыкания в аварийных режимах.....	258
ПРИЛОЖЕНИЕ З	Патенты на изобретения и полезные модели.....	271
ПРИЛОЖЕНИЕ И	Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы.....	278



## ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт сейчас является одним из основных видов транспорта в нашей стране, обеспечивающим потребности промышленных предприятий, организаций, индивидуальных предпринимателей и граждан в грузопассажирских перевозках. Эксплуатационная длина железнодорожных линий в нашей стране составляет 86 тыс. километров, из них электрифицировано – 39,5 тыс. километров. По протяженности электрифицированных железных дорог Россия занимает второе место уступая лишь Китаю.

Электрифицированный железнодорожный транспорт получил широкое распространение в нашей стране благодаря ряду значительных преимуществ по сравнению с тепловозной тягой: низкая стоимость перевозок, большая скорость движения поездов, высокая экологичность. Учитывая большую протяженность территории России, электрифицированный железнодорожный транспорт является наиболее оптимальным.

**Актуальность проблемы.** Основу электрической железной дороги составляет система электроснабжения, которая в свою очередь состоит из питающих линий электропередач различного напряжения, тяговых трансформаторных подстанций и тяговой сети железных дорог. Тяговая сеть состоит из контактной сети и рельсовой сети. Контактная сеть является совокупностью проводов, опорных и поддерживающих конструкций. К опорным конструкциям относятся отдельные и нераздельные опоры, воспринимающие нагрузку от веса проводов, консолей и фиксаторов, а также ветровые и гололедные нагрузки. На сегодняшний день наибольшее распространение на электрифицированных дорогах нашей страны получили железобетонные опоры. Несущая способность таких опор напрямую зависит от состояния арматуры опоры, основным повреждением которой является коррозия. Наиболее остро вопрос коррозионных повреждений опор стоит на участках постоянного тока. Речь идет об электрической коррозии арматуры опор под действием блуждающих токов. Особенность таких повреждений заключается

в трудности их диагностирования, при этом снижение несущей способности опоры может привести к ее падению.

Электрокоррозия является следствием особенности работы рельсовой сети – совмещение функций обратного провода с рабочим и защитным заземляющим устройством. Использование рельсовой сети для заземления опор контактной сети требует применения специальных устройств, предотвращающих электрическое соединение заземляемого оборудования железнодорожного транспорта с рельсами в нормальном режиме работы системы электроснабжения. Такими устройствами являются искровые промежутки, диодные и тиристорные заземлители, система защиты опор, изолированных от рельсов (ЗОИР). Их основная задача – предотвратить утечку тяговых токов через заземляемое оборудование в землю. Указанные устройства и системы требуют дополнительных материальных расходов и трудовых ресурсов для их нормальной эксплуатации.

Актуальность проблемы повышения эффективности работы устройств электроснабжения на электрифицированном транспорте состоит в устранении возможных отказов и повреждений опор контактной сети по причине электрической коррозии.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме защиты от электрокоррозионных повреждений опорных конструкций посвящено множество научных работ таких ученых как А.М. Брылеев, А.И. Гуков, Ю.А. Кравцов, А.В. Котельников, Б.И. Косарев, А.Б. Косарев, В.А. Кандаев, А.А. Кудрявцев, Э.Г. Селедцов, К.Б. Кузнецов, В.И. Подольский, А.В. Шишляков и другие.

Указанная проблема непосредственно связана с распределением потенциала рельсовой сети и протеканием блуждающих токов. Исследованиями в этой области занимались указанные выше ученые, а также А.Н. Матвеев, К.Г. Марквардт, И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев и другие.

Исследованию и математическому моделированию заземляющих устройств посвящены работы таких ученых как В.В. Бургсдорф, А.Н. Данилин, А.И. Сидоров, С.Л. Шишигин, К.В. Авдеева.

Исследованиями в области систем заземления на электрифицированном транспорте занимались такие иностранные ученые как *M.M. Alamuti, H. Nouri (University of the West of Eng-land), A. Gholami (Iran University of Science and Technology), W. Guangning , L. Zhou (Southwest Jiaotong University, Chengdu), A. Mariscotti (University of Genova), L. Sandrolini (University of Bo-logna), L. Rouco (Universidad Pontificia Comillas)*.

Тема соответствует пункту 4 паспорта научной специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): «Совершенствование подвижного состава, тяговых подстанций, тяговых сетей, включая преобразователи, аппараты, устройства защиты, схемы электро-снабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения».

**Целью диссертационной работы** является совершенствование тяговых сетей постоянного тока на основе использования протяженных заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих систем заземления и защиты опор контактной сети, а также способов расчета сложных заземляющих устройств. Разработать варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств с изменением функциональных свойств, которые позволят повысить эксплуатационные показатели опор контактной сети постоянного тока и снизить расходы на обслуживание оборудования контактной сети.

2. Оценить с помощью возможностей компьютерного моделирования распределение электрического поля внутри железобетонных опор и фундаментов различной конструкции, а также вокруг электрифицированной линии при использовании заземляющих устройств. Разработать математическую модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» с учетом взаимного влияния элементов системы.

3. Провести верификацию математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.

4. Разработать методику оценки вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств. На основе разработанной методики и математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» оценить эффективность вариантов конструктивного заземляющих устройств.

**Область исследования:** улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения.

**Объект исследования:** устройства электроснабжения железных дорог.

**Научная новизна работы.**

1. Исследовано распределение электрического поля внутри отдельных, нераздельных железобетонных опор и трехлучевых фундаментов с помощью трехмерного моделирования.

Введено понятие «взаимной проводимости» рельсовой сети и протяженного заземлителя, определяемой на основе распределения электрического поля в плоскости перпендикулярной оси пути.

Разработана математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель», учитывающая взаимное влияние элементов системы и наличие железобетонных опор и фундаментов.

2. Реализована физическая аналоговая модель участка постоянного тока, основанная на цепных схемах. С помощью физической аналоговой модели проведена верификация математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель».

3. Разработана методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Теоретическая значимость:

1. С помощью численных методов определена величина сопротивления отдельных, нераздельных опор и трехлучевых фундаментов при различных удель-

ных сопротивлениях бетона и грунта, а также величина взаимной проводимости элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» при различных значениях удельного сопротивления элементов верхнего строения пути.

2. Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» позволила оценить распределение потенциалов и токов между элементами системы при различных вариантах конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

3. Использование методики оценки эффективности позволило выявить наиболее эффективный вариант конструктивного исполнения с применением заземляющего провода.

**Практическая значимость:**

1. Применение протяженных заземляющих устройств позволит снизить интенсивность электрической коррозии железобетонных опор и других поддерживающих конструкций, увеличить продолжительность их эксплуатации и снизить затраты на обслуживание устройств электроснабжения.

2. Практическая значимость работы подтверждается получением патентов на изобретения, полезные модели и актом внедрения результатов научно-исследовательской работы.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы расчета протяженных и сложных заземляющих устройств, положения теории электромагнитных полей, цепных схем, математического моделирования, планирования эксперимента, подобия, конечно-элементных расчетов. Для исследований с применением метода конечных элементов использован программный комплекс *Comsol Multiphysics*. Экспериментальная часть включает в себя лабораторные исследования на физической аналоговой модели и последующую обработку экспериментальных данных. Расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований не превышает 10%.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния удельного сопротивления грунта, бетона и наличия гидроизоляции на величину сопротивления растеканию отдельных, не отдельных железобетонных опор и фундаментов.

Результаты компьютерного моделирования распределения электрического поля, создаваемого рельсовой сетью и протяженным заземлителем, в плоскости перпендикулярной оси пути. Оценка зависимости величины взаимной проводимости системы «рельсы-протяженный заземлитель» от удельных сопротивлений элементов верхнего строения пути.

2. Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель», учитывающая взаимную проводимость элементов системы и сопротивление железобетонных опор и фундаментов.

3. Результаты экспериментального исследования распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель», полученных с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.

4. Методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

5. Результаты анализа эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств для железной дороги постоянного тока.

**Степень достоверности результатов** подтверждается сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, при этом расхождение результатов не превышает 10%. Обоснованность результатов подтверждается корректным применением методов математического и физического моделирования, теории подобия, методов расчета протяженных и сложных заземляющих устройств, метода конечных элементов.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертационной работы докладывались на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы техносферной безопасности и природообустройства» (Благовещенск, 2014), VII Международном симпозиуме «Eltrans-2015» (Санкт-Петербург, 2015), VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2015), регио-

нальной научно-практической конференции «Полигонная технология вождения поездов весом 8-9 тысяч тонн на направлении Кузбасс-Северо-Запад» (Екатеринбург, 2015), постоянно действующем научном семинаре аспирантов УрГУПС (Екатеринбург, 2016), заседаниях кафедры «Электроснабжение транспорта».

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 14 печатных работах, в том числе 7 работ опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», из них 4 статьи и 3 патента. Автору принадлежат 4,3 печатных листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 279 страницах, содержит 192 страницы основного текста, 80 рисунков, 8 таблиц и 9 приложений на 87 страницах, 141 наименования библиографического списка, включая 11 наименований иностранных источников.

# 1 АНАЛИЗ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

## 1.1 Особенности работы рельсовой сети электрифицированной железной дороги

Исторически сложилось, что для заземления оборудования электрифицированных железных дорог и опор контактной сети в нашей стране применяется рельсовая сеть, которая считается естественным заземлителем. Рельсовая сеть, как длинная линия, характеризуется продольным и поперечным сопротивлением, последнее принято называть переходным сопротивлением «рельсы-земля».

Формально соединение опор контактной сети на участках постоянного тока с рельсами не правильно называть заземлением. На электрифицированном транспорте постоянного тока рельсы являются обратным проводником, по которому ток возвращается к источнику электроснабжения. Соединение опор с рельсами при пробое изоляции контактной сети обеспечивает замыкание прямого провода (контактной сети) на обратный провод.

В случае же соединения с рельсами оборудования расположенного вдоль железной дороги, например комплектных трансформаторных подстанций, сигнальных точек СЦБ, такое соединение будет являться заземлением, поскольку рельсовая сеть считается естественным заземлителем.

И в том и в другом случае, чем ниже сопротивление рельсовой сети, тем надежнее работа защит и тем больше электробезопасность для эксплуатационного персонала. Здесь под сопротивлением рельсовой сети понимается сопротивление с учетом переходного сопротивления «рельсы-земля».

Таким образом, первой особенностью работы рельсовой сети на электрифицированном транспорте является использование рельсовой сети в качестве естественного заземлителя для опор контактной сети и для оборудования расположенного вдоль железной дороги.



Другой особенностью работы рельсовой сети является использование ее в качестве канала для сигнальных токов СЦБ.

В нашей стране для интервального регулирования движения поездов используется автоматическая блокировка. При этом перегон разделяется на блок-участки, оборудованные рельсовыми цепями, которые являются датчиками информации о наличии или отсутствии поезда. Любая рельсовая цепь включает источник электрической энергии и приемник. Принцип действия рельсовых цепей заключается в том, что при соединении рельсов через колесную пару, вырабатывается сигнал о занятости блок-участка. При этом важно, чтобы сигнал без искажений дошел до приемника. Искажения могут возникать при малом переходном сопротивлении «рельсы-земля», т.е. часть сигнального тока будет стекать в землю. Помимо этого сигнальный ток может стекать через оборудование, соединенное с рельсами и с землей, в основном, через опоры контактной сети. Следовательно, с точки зрения устройств СЦБ для надежной работы рельсовых цепей необходимо осуществлять присоединение к рельсам как можно реже. При этом должно поддерживаться высокое значение переходного сопротивления «рельсы-земля».

Таким образом, возникает противоречие в требованиях к параметрам рельсовой сети: у рельсовой сети как естественного заземлителя должно быть минимальное переходное сопротивление «рельсы-земля», но у рельсовых цепей желательно иметь максимальное переходное сопротивление.

Помимо описанных особенностей, характерных для электрифицированных железных дорог в целом, существует особенность, характерная только для электрифицированных дорог постоянного тока. Речь идет об электрической коррозии.

Электрическая коррозия представляет собой электрохимический процесс разрушения поверхности металла при протекании внешнего постоянного тока из металла в электролит. В случае с электрическими железными дорогами электролитом является грунт. Наличие переходного сопротивления между грунтом и подземными сооружениями, а также оборудованием самой железной дороги создает условия для возникновения электрокоррозии.

Поскольку на участках постоянного тока полярность тока и напряжения не меняется во времени, в сравнении с участками переменного тока, возникают устойчивые анодные и катодные зоны, также принято выделять знакопеременные зоны [1]. Анодной зоной считается зона, в которой наблюдается положительный потенциал рельсов относительно земли, соответственно в этой зоне ток стекает из рельсовой сети в землю. Положительный потенциал наблюдается вблизи электроподвижного состава, потребляющего электрический ток из контактной сети. Катодной зоной считается зона, в которой потенциал рельсов относительно земли отрицательный, при этом ток втекает в рельсы из земли. Устойчивые катодные зоны наблюдаются вблизи тяговых подстанций, т.е. там, где тяговый ток возвращается от электроподвижного состава. Знакопеременной же считается зона, где потенциал рельсов меняет знак, т.е. наблюдается как стекание тока с рельсов, так и втекание.

С точки зрения электрокоррозии опасными являются анодные и знакопеременные зоны [2]. В этих зонах возможно не только стекание тока с рельсов, но и стекание тока через оборудование, соединенное с рельсами. При этом корродировать будет именно оборудование, через которое ток будет стекать в землю. Таким оборудованием могут быть опоры контактной сети и их фундаменты, мачты сигнальных точек, напольное оборудование СЦБ и другие конструкции соединенные с рельсами.

## **1.2 Теоретические положения, используемые при расчете систем заземления опор контактной сети**

Исходя из особенностей работы электрифицированной железной дороги, можно выделить две задачи, которые необходимо решить при выборе способа заземления опор контактной сети. Первая – задача защиты от электрокоррозии фундаментов и арматуры подземной части опор, характерная для участков посто-

янного тока. Вторая – задача обеспечения надежной работы защит фидеров тяговых подстанций при замыкании контактной сети на заземленные конструкции.

Задаче защиты от электрокоррозионных повреждений железобетонных фундаментов и стоек посвящено множество научных работ таких ученых как А.И. Гуков, А.В. Котельников [1,2,3,4], Б.И. Косарев [5,6], А.Б. Косарев [5,7], В.А. Кандаев [2,8-13], А.А. Кудрявцев, Э.Г. Селедцов, К.Б. Кузнецов [14,15], Павлов А.В. [16], В.И. Подольский [17], Порцелан А.А. [18].

Указанная задача непосредственно связана с распределением потенциала рельсовой сети и протеканием блуждающих токов. Исследованиями в этой области занимались указанные выше ученые, а также А.Н. Матвеев, К.Г. Марквардт [19,20], И.В. Стрижевский [21,22], В.И. Дмитриев [21].

Исследованию и математическому моделированию заземляющих устройств посвящены работы таких ученых как В.В. Бургсдорф [31], А.Н. Данилин [32], А.И. Сидоров [35-41], С.Л. Шишигин [43-45], К.В. Авдеева [48, 52, 53].

Исходной математической моделью, используемой для исследования распределения потенциала рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах постоянного тока, можно считать систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_p}{dx} &= -r_p I_p \\ dI_p &= -\frac{\varphi_p}{r_{p3}} dx \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

где  $\varphi_p$  – потенциал рельсовой сети относительно удаленной земли, В;

$I_p$  – ток рельсовой сети, А;

$r_p$  – погонное сопротивление рельсовой сети, Ом/км;

$r_{p3}$  – переходное сопротивление рельсовой сети, Ом·км.

Решения этой системы уравнений при различных начальных условиях представлены в [11,12]. При использовании этой математической модели применяется принцип суперпозиции: каждый ток (ток электроподвижного состава, ток тяговой подстанции) рассматривается отдельно, а затем все полученные результаты скла-

дываются в общую кривую распределения потенциала рельсовой сети. На основе этой кривой можно выделить зоны распределения потенциала: анодную, катодную и знакопеременную

При расчете распределения потенциала рельсовой сети на переменном токе необходимо учитывать индуктивное влияние между контурами «контактный провод – земля» и «рельсы – земля», тогда система уравнений (1.1) примет следующий вид [11]

$$\left. \begin{aligned} d\varphi_p &= -(z_p I_p + I_0 z_{kp}) dx, \\ dI_p &= -\frac{\varphi_p}{z_{p3}} dx. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

На электрических железных дорогах переменного тока проблема электрокоррозии стоит не так остро по сравнению с железными дорогами постоянного тока, однако в системе переменного тока актуальной является проблема электромагнитного влияния на смежные линии.

В указанных выше системах уравнений используется такая величина как переходное сопротивление «рельсы-земля», соответственно возникает задача его определения. Решением этой задачи занимались В.В. Бургсдорф [31], А.Л. Вайнер, Р.Н. Карякин, К.Б. Кузнецов [14], Б.И. Косарев, А.Б. Косарев [5].

Наиболее известной моделью аналитического расчета переходного сопротивления является многослойная модель [5], в которой рельсы рассматриваются как прямолинейные однородные параллельные проводники. Стеkanie тока с рельсов происходит с бесконечного количества прямоугольных металлических пластин. При этом переходное сопротивление определяется многочленом

$$r_{p3} = b_0 + b_1 \rho_6 + b_2 R_{ш} + b_3 \rho_{91}^0 + b_4 Z_2 + b_5 h_n + b_6 \rho_n, \quad (1.3)$$

где  $\rho_{ш}, \rho_0, \rho_n$  – удельное электрическое сопротивление материалов шпал, балласта и насыпи соответственно, Ом·м;

$\rho_{\text{э1}}^0$  – эквивалентное электрическое сопротивление грунта, кОм;

$R_{\text{ш}}$  – электрическое сопротивление шпалы, кОм;

$h_{\text{ш}}$  – высота насыпи, м;

$b_0$ - $b_6$  – экспериментальные коэффициенты.

В [14] разработана альтернативная методика расчета переходного сопротивления «рельсы-земля». Основываясь на экспериментальных данных, полученных с помощью метода вертикального электрического зондирования, опытного участка ст. Полетаево – ст. Биргильда, в [14] была предложена формула, представляющая собой неявную зависимость переходного сопротивления от входящих в нее измеренных и рассчитанных величин.

$$r_{\text{пз}} = 0,318 \cdot \rho \cdot \frac{\Omega_{[0,\alpha Y_1]} - K\Omega_{[0,\alpha Y_2]}}{1 - K} \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;

$\Omega$  – специальная функция Зунде;

$K$  – отношение измеренных значений напряжений;

$Y_1, Y_2$  – координаты в плоскости, перпендикулярной оси пути, м;

$\alpha$  – аргумент функции Зунде.

В дальнейшем, рассматривая рельсовую сеть как протяженный заземлитель, лежащий на поверхности земли, и основываясь на теории длинных линий, была предложена упрощенная формула определения переходного сопротивления «рельсы-земля» [14]

$$r_{\text{пз}} = \frac{0,203}{R_{\text{пз}}^2 \gamma_i \gamma_a z_p} \quad (1.5)$$

где  $R_{\text{пз}} = \sqrt{R_{\text{р}} \cdot a_{\text{р12}}}$  – эквивалентный радиус однопутной рельсовой линии, м;

$R_{\text{р}}$  – эквивалентный радиус одного рельса, м;

$a_{\text{р12}}$  – расстояние между рельсами, м;

$\gamma_i$  – проводимость рельсовой стали,  $8,33 \cdot 10^6$  См/м;

$\gamma_a$  – проводимость грунта, См/м;

$z_p$  – продольное электрическое сопротивление рельсовой линии, Ом·км.

В данной работе на основе разработанной методики расчета сложных неоднородных заземляющих устройств методом цепных схем и методом относительного сопротивления, развиваются методы расчета и совершенствуется устройство для заземления опор контактной сети [15] с применением протяженного заземлителя.

В общем случае протяженное заземляющее устройство представляет собой систему «трос – опоры» и протяженный горизонтальный заземляющий электрод, находящийся в земле. Учитывая экранирующие свойства проводящего пространства земли, указанная выше линия заменяется системой последовательно соединенных симметричных четырехполюсников.

На основании теории цепных схем можно получить выражения, характеризующие ток и напряжение любого элемента цепной схемы из множества  $n$ , для протяженного заземлителя и рельсов, проложенных параллельно друг другу.

$$\left. \begin{aligned} u_{nz} &= u_{0z} \cosh(n \cdot g_3) + z_3 \cdot (i_{y0} - K_1 i_p) \cdot \sinh(n g_3) \\ (i_{yn} - K_1 i_k) &= \frac{u_{0z}}{z_3} \cdot \sinh(n \cdot g_3) + (i_{y0} - K_1 i_k) \cdot \cosh(n g_3) \\ u_{np} &= u_{0p} \cdot \cosh(n g_p) + z_p (i_{y0} - K_2 i_k) \cdot \sinh(n g_p) \\ (i_{yn} - K_2 i_k) &= \frac{u_{0k}}{z_k} \cdot \sinh(n g_k) + (i_{y0} - K_1 i_k) \cdot \cosh(n g_p) \end{aligned} \right\}, \quad (1.6)$$

где  $u_{0z}$ ,  $u_{0p}$  – напряжение на входе цепных схем заземлителя и рельса, В;

$u_{nz}$ ,  $u_{np}$  – напряжение на выходе  $n$ -ого четырехполюсника, В;

$i_{y0}$ ,  $i_{yn}$  – ток на входе и выходе цепной схемы, А;

$i_k$  – ток в контактной сети, А;

$z_3$ ,  $z_p$  – характеристические сопротивления четырехполюсников цепной схемы для протяженного заземляющего устройства и рельсов, Ом;

$g_z, g_p$  – характеристические постоянные передачи четырехполюсников для протяженного заземляющего устройства и рельсов;  
 $K_1, K_2$  – коэффициент связи контактной сети соответственно с протяженным заземляющим устройством и рельсами.

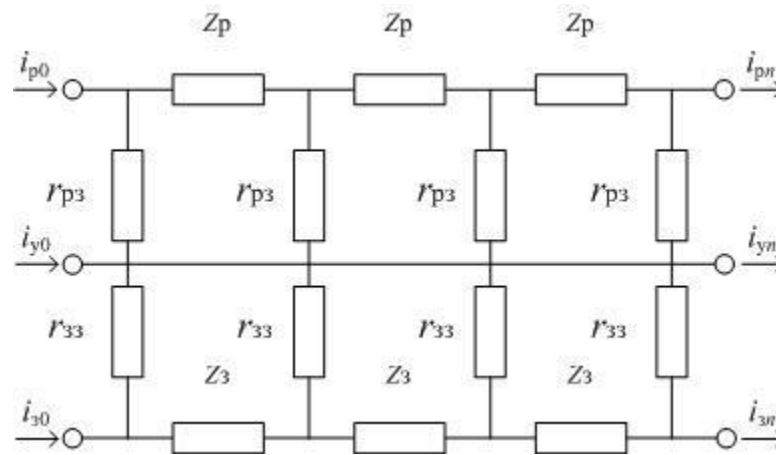


Рисунок 1.1 – Схема замещения системы «провод–рельс–протяженный заземлитель»

Также стоит отметить цепно–полевую модель заземляющего устройства, разработанную С.Л. Шишигиным [43–45]. Указанная модель относится к заземляющим устройствам систем обеспечения движения поездов и также основывается на теории цепных схем. Она представляет собой многозвенную цепную схему, состоящую из симметричных четырехполюсников. Отличительная особенность указанной модели состоит в том, что четырехполюсники обладают собственными продольными активно–индуктивными сопротивлениями и поперечными активно–емкостными проводимостями.

На сегодняшний день методика расчета вертикальных заземлителей, применяемых в различных заземляющих устройствах разработана достаточно подробно. Существует два наиболее распространенных метода расчета заземлителей [43]: на основе решения уравнения Лапласа для потенциала точечного источника и метод

зеркальных изображений [5,43]. Также следует отметить метод расчета сложных заземляющих устройств методом относительных сопротивлений [14].

Первый метод заключается в том, что заземлитель заменяется совокупностью точечных источников тока, причем форма одной из эквипотенциальных поверхностей их результирующего электрического поля близка по форме к поверхности рассматриваемого заземлителя.

Основным уравнением данного метода является двумерное уравнение Лапласа, получаемое при переходе к криволинейной ортогональной цилиндрической системе координат  $(r, z, \psi)$ , причем ось  $z$  перпендикулярна к границе полупространства и проходит через точечный источник.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{H_2 \cdot H_3}{H_1} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{H_3 \cdot H_1}{H_2} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1.7)$$

где  $H_1, H_2, H_3$  – коэффициенты Ламэ.

Для нахождения общего решения уравнения (1.7) применяется метод Фурье. Общее решение уравнения представляет собой сумму всех частных решений.

$$\varphi = \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) \cdot (C_1 \alpha e^{\lambda z} + C_2 \beta e^{-\lambda z}) d\lambda, \quad (1.8)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования;

$\alpha, \beta$  – постоянные, не зависящие от координат  $r$  и  $z$ .

После определения всех постоянных возможно два варианта дальнейшего решения: первый – численный, основанный на взятии несобственных интегралов и получении численных значений потенциала в заданных точках проводящего полупространства (этот метод применяется при многослойной земле), и второй – аналитический, результатом которого является решение в виде сумм рядов.

Метод зеркальных изображений также основан на поиске решения, удовлетворяющего уравнению Лапласа. Отличие заключается в том, что эквипотенци-



альные поверхности заменяются металлическими поверхностями с теми же потенциалами, что не искажает поля [5].

Разновидностью метода зеркальных изображений является метод оптической аналогии [43], при котором точечный источник тока уподобляется источнику света, который отражается и преломляется в системе полупрозрачных зеркал, расположенных на границе слоев.

Следует отметить методику совместного применения метода зеркальных изображений и метода интегральных уравнений разработанную С.Л. Шишигиным [44]. Указанная методика позволяет проводить расчеты заземлителей в многослойной земле как с горизонтальными, так и с вертикальными неоднородностями.

Методика расчета сложных заземляющих устройств методом относительного сопротивления, основывается на том, что в качестве относительного сопротивления растеканию заземляющего устройства принимается сопротивление заземляющего устройства единичного размера в слое земли с единичным удельным сопротивлением. В многослойной земле геометрические размеры слоев выражаются в долях от единичного размера.

Рассматривая полусферическое заземляющее устройство, расположенное в двухслойном проводящем пространстве земли, было получено выражение определяющее сопротивление заземляющего устройства

$$R_{3y} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\pi r_1} + \frac{\rho_1}{2\pi r_3} \quad (1.9)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – удельные сопротивления соответственно первого и второго слоев земли;

$r_3$  – радиус заземляющего устройства полусферической формы;

$r_1$  – расстояние от центра заземляющего устройства до внешней границы первого слоя земли.

Приняв радиус заземляющего устройства равным единичному размеру  $r_3=1$  и выразив толщину первого слоя земли через радиус заземлителя  $r_1=r_3+A=1+A$ , где

$A$  – толщина верхнего слоя между поверхностью заземляющего устройства и границей раздела слоев, выраженная в долях от единицы, а также приняв удельное сопротивление первого слоя земли за единицу  $\rho_1=1$  и  $\rho_1/\rho_2=B$ , было получено выражение, характеризующее относительное сопротивление растеканию полусферического заземляющего устройства в двухслойной проводящей среде

$$R_{3y}^* = \frac{1}{2\pi} + \frac{B-1}{2\pi(A+1)} \quad (1.10)$$

Учитывая, что электрическое поле заземляющего устройства любой формы, на некотором удалении, представляет собой сферические эквипотенциальные поверхности, то с помощью указанного выражения, при определенных условиях, можно моделировать заземляющие устройства любой формы сферическим заземляющим устройством.

### **1.3 Анализ отечественных систем заземления опор контактной сети**

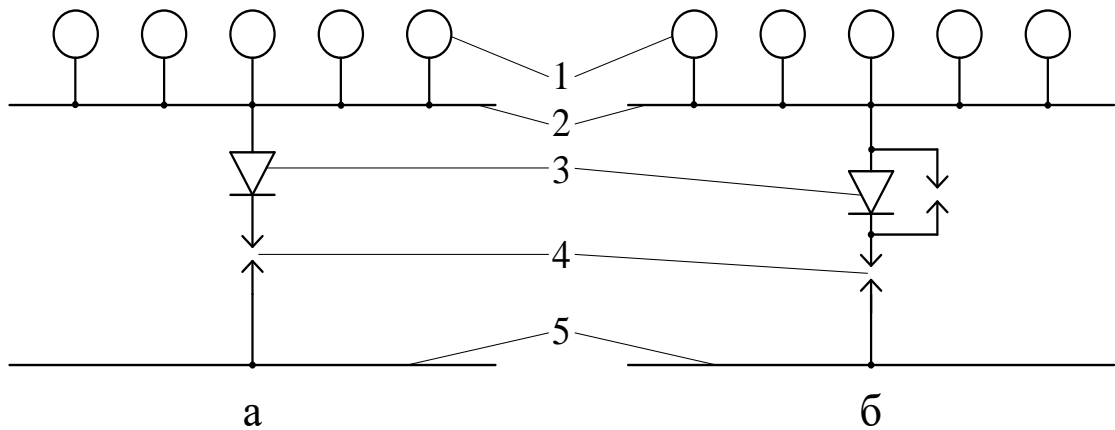
Исходя из описанных особенностей работы электрифицированных железных дорог, можно выделить два направления в развитии систем заземления опор контактной сети. Первое направление основывается на использовании рельсовой сети в качестве заземляющего устройства. Второе направление основывается на использовании систем защиты при опорах, отсоединенных от рельсов.

К первому направлению можно отнести системы заземления опор применяемые на сегодняшний день на сети дорог с использованием защитных устройств: искровых промежутков, диодных и диодно-искровых заземлителей. В общем случае к подобным системам заземления опор предъявляется следующее требование: обеспечивать изоляцию опор от рельсовой сети в нормальном режиме и надежное соединение опор с рельсами в аварийном режиме. С начала 60х гг. в качестве за-

щитного устройства начали применять искровые промежутки типа ИМП-62М. Однако опыт эксплуатации показал, что они не способны работать многократно, т.е. выходят из строя при первом коротком замыкании, а также, что они подвержены пробоем при коротком замыкании на подвижном составе и при перекрытии роговых разрядников [18]. В 1968 г. УЭМИИТ предложил ЦЭ МПС применять в качестве защитного устройства диодный заземлитель, состоящий из трех параллельно соединенных полупроводниковых вентилях В-200 10-ого класса, на основании которого был разработан диодный заземлитель ЗД-1. Данное устройство использовалось для группового заземления опор с использованием тросового объединения. При этом диодный заземлитель при необходимости может пропускать импульс обратно приложенного напряжения, переходя в лавинный режим. Однако опыт эксплуатации показал, что диодные заземлители подвержены электрическому пробоем, особенно при установке вблизи роговых разрядников и мест трогания и разгона поездов. Кроме того при воздействии обратного напряжения в лавинный режим переходит только один вентиль из трех с меньшим напряжением лавинообразования [14], в силу разброса параметров полупроводниковых приборов.

Также разрабатывались устройства, комбинирующие искровые промежутки и полупроводниковые вентили и трос группового заземления. Примером может быть устройство описанное в [4] (рисунок 1.2 а). Суть устройства заключается в последовательном включении полупроводникового вентиля и искрового промежутка, причем вентиль анодом присоединяется к тросу группового заземления, а катодом – к электроду искрового промежутка.

Непосредственно к рельсам присоединялся искровой промежуток. Кроме этого общая точка полупроводникового вентиля и искрового промежутка соединялась с контрольным выводом. Преимуществом устройства являлось защищенность полупроводникового диода от перенапряжений со стороны рельсов при коротком замыкании контактной сети на рельс, кроме того увеличивалась многократность срабатывания искрового промежутка.



1 – опора контактной сети, 2 – заземляющий трос, 3 – полупроводниковый вентиль, 4 – искровой промежуток, 5 – рельсовая сеть

Рисунок 1.2 – Устройства для заземления опор контактной сети с применением полупроводниковых вентилях и искровых промежутков

Развитием идеи совместного применения вентилях и искровых промежутков является устройство, описанное в [85] (рисунок 1.2 б). Оно отличается от предыдущего устройства тем, что параллельно вентиле включен еще один искровой промежуток. Такое решение позволило повысить надежность полупроводникового вентиля.

Общим недостатком для всех описанных устройств является необходимость использования большого числа полупроводниковых вентилях и искровых промежутков, исправность которых необходимо проверять 1 раз в квартал. Кроме того, большое число присоединений к рельсовой сети увеличивает влияние на рельсовые цепи автоблокировки.

Второе направление основывается на отказе от соединения опор с рельсовой сетью. К этому направлению можно отнести такие системы как потенциальная защита Донецкой железной дороги (ПЗК), мгновенная потенциальная защита (МПЗ), а также тросовые системы защит с изолированным тросом и датчиком пробоя.

Защита ПЗК [15], предложенная в 1970-е гг., содержит дополнительный провод, протянутый по опорам контактной сети, отсоединенный от рельсов. Ме-

таллические части опор, не находящиеся нормально под напряжением, присоединяют к дополнительному проводу, длина которого не должна превышать 2 - 3 км (рисунок 1.3).

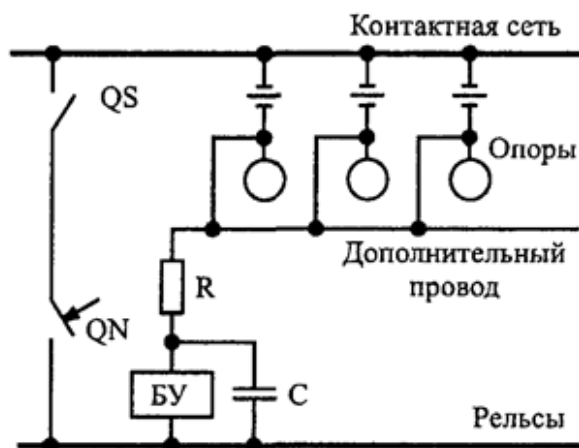


Рисунок 1.3 – Схема потенциальной защиты Донецкой железной дороги.

Дополнительный провод через ограничительное сопротивление  $R$  и блок управления БУ соединяется с рельсами. Блок БУ управляет включением короткозамыкателя  $QN$ , подключенного, в свою очередь, через разъединитель  $QS$  между контактной сетью и рельсами.

При перекрытии изоляции опоры на дополнительном проводе появляется напряжение и начинает заряжаться конденсатор  $C$ . Как только напряжение на нем превысит 350 - 400 В, срабатывает блок управления БУ, который включает короткозамыкателя  $QN$ . Возникшее короткое замыкание отключается выключателями подстанции и поста секционирования.

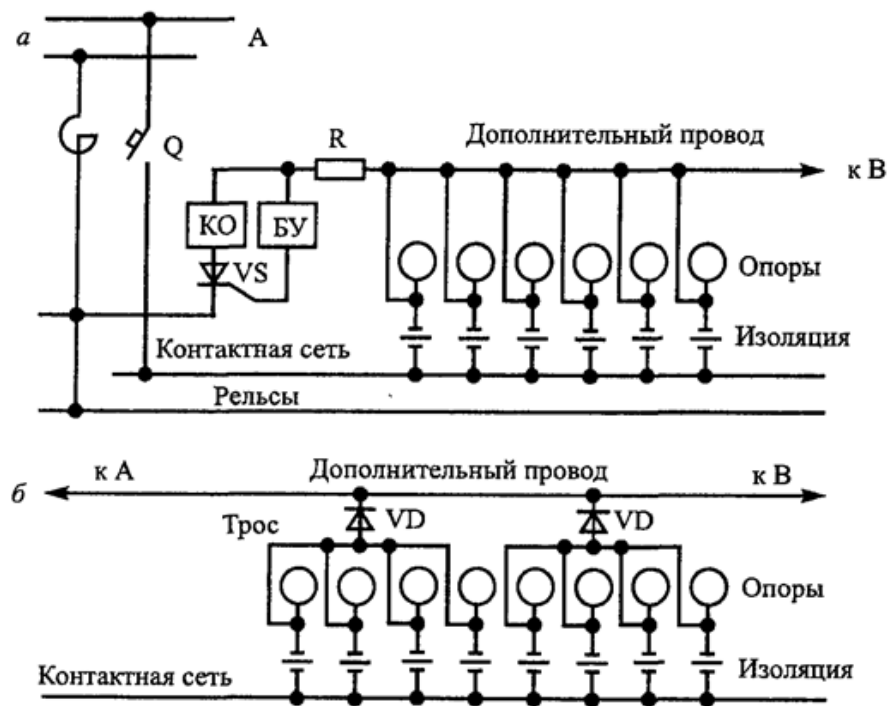
Положительным качеством защиты является ее автономность, т.е. возможность установки на перегоне и именно на тех опорах, которые требуют защиты от электрокоррозии.

Защита ПЗК не получила распространения из-за отсутствия в те годы надежного короткозамыкателя, а также по причине неработоспособности на

участках с металлическими опорами из-за их малого сопротивления относительно земли.

Мгновенная потенциальная защита (МПЗ), разработанная Северо-Кавказской железной дорогой и РИИЖТом имела следующую конструкцию: на всех опорах контактной сети к кронштейну подвешивался дополнительный провод марки АС-35, к которому присоединяется навесная арматура опор, нормально не находящуюся под напряжением [18].

На смежных подстанциях дополнительный провод ДП (рисунок 1.4 а) присоединяют к фидеру обратного тока через ограничительный резистор  $R$ , дополнительную катушку отключения КО фидерного быстродействующего выключателя  $Q$  и тиристор  $VS$ . Блок управления БУ тиристором определяет уставку по напряжению в дополнительном проводе, при котором тиристор открывается (80 - 200 В).



а – Северо-Кавказской железной дороги, б – Южно-Уральской железной дороги

Рисунок 1.4 – Схема мгновенной потенциальной защиты

При повреждении изоляции контактной сети потенциал дополнительного провода относительно потенциала фидера обратного тока резко возрастает, тиристор  $VS$  открывается и через катушку КО проходит ток, отключающий быстродействующий выключатель. Резистор  $R$  сопротивлением 300 Ом ограничивает ток в КО при близких коротких замыканиях. Эта защита хорошо работает только на однопутных участках при значительном переходном сопротивлении «опора - грунт». В случае нарушений в технологии изготовления опор, а также при сырых грунтах результирующее сопротивление дополнительного провода может снизиться из-за шунтирующего влияния опор до величины 6 - 8 Ом. При удаленных коротких замыканиях ток в КО в этом случае оказывается настолько мал, что выключатель не отключается. Поэтому зона действия защиты в таких условиях не превышает 15 км.

На двухпутных участках при коротком замыкании на одном из путей во время переходного процесса на дополнительном проводе второго пути наводится ЭДС от 400 до 500 В. Это вызывает открытие тиристора в защите второго пути и ложное отключение выключателя. Испытания показали, что при двустороннем питании двухпутного участка из 44 случаев короткого замыкания до 95% срабатываний МПЗ были ложными. Еще одним недостатком указанной защиты является отсутствие в ее конструкции какой-либо защиты от атмосферных перенапряжений. Кроме того МПЗ обладает низкой помехоустойчивостью, что подтверждается наличием таких видов ложных срабатываний как срабатывание быстродействующих выключателей соседнего пути при двустороннем питании двухпутного участка.

Рассмотренный вариант защиты МПЗ был усовершенствован [18] на Южно-Уральской железной дороге. Группы опор 20-25 шт. объединяют отрезком троса ПС-25 длиной 1200-1300 м (рисунок 1.4 б). Все отрезки тросов на межподстанционной зоне присоединяют к дополнительному проводу ДП через диодные блоки  $VD$ , состоящие из трех параллельно включенных диодов ВЛ200 10-го или 12-го класса. Сопротивление дополнительного провода относительно земли возрастает почти на три порядка, что позволяет поднять уставку блока БУ до 600-650 В. В

этом случае по всей межподстанционной зоне защита не имеет мертвых зон и на двухпутных участках не срабатывает ложно.

К тросовым системам защит с изолированным тросом в первую очередь относится защита опор, изолированных от рельса (ЗОИР) Свердловской железной дороги. В этой защите опоры отсоединяются от рельсовой цепи, а их металлические части подключаются к дополнительному проводу. Исключением являются лишь опоры, которые в соответствии с установленными правилами должны присоединяться к рельсу индивидуальными заземлителями.

Отличительными особенностями этой защиты являются подвешивание дополнительного провода на изоляторах, присоединение металлических частей опоры к дополнительному проводу через искровые промежутки  $FV$ , наличие короткозамыкателей  $QN$  (рисунок 1.5). Дополнительный провод подвешивается на опорах на специальных кронштейнах, он может быть стальным малого сечения (ПС-25) или биметаллическим (БСМ-4), его протяженность охватывает расстояние от станции до станции или поста секционирования. В середине защищаемого участка и по его краям устанавливаются блоки защиты  $A1, A2, A3$ , состоящие из входного устройства  $FB$  (БУ) и короткозамыкателя  $QN$ .

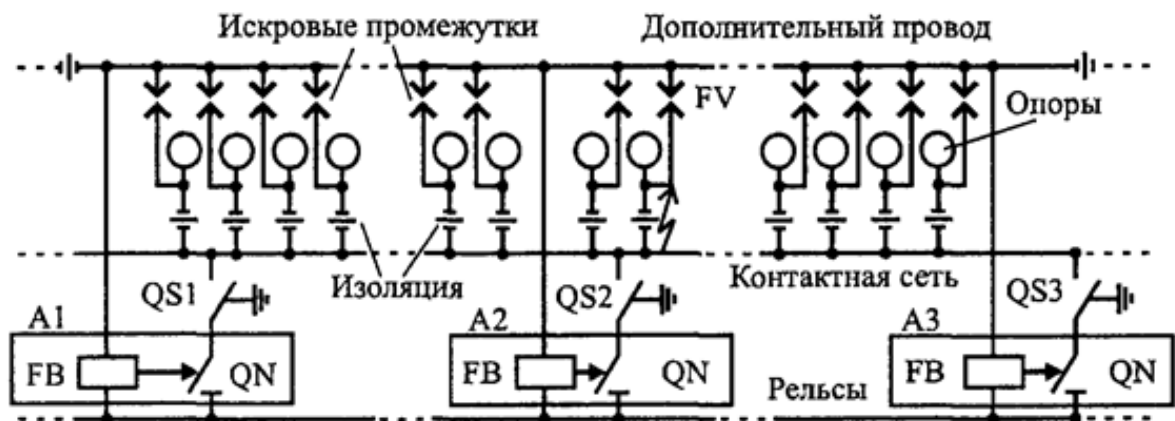


Рисунок 1.5 – Схема защиты опор, изолированных от рельсов



Входное устройство одним концом присоединяется к дополнительному проводу, а другим к запальному устройству СВ и рельсу. Упрощенная схема входного устройства защиты приведена на рисунке 1.6. Она содержит коммутационный элемент в виде тиристора  $VS$ , напряжение открытия которого (750-900 В) определяется варистором  $RU1$ . Защита тиристора от пробоя при появлении в дополнительном проводе коммутационных или атмосферных перенапряжений осуществляется варисторами  $RU2$  и  $RU3$  с напряжением пробоя  $2400 \pm 240$  В.

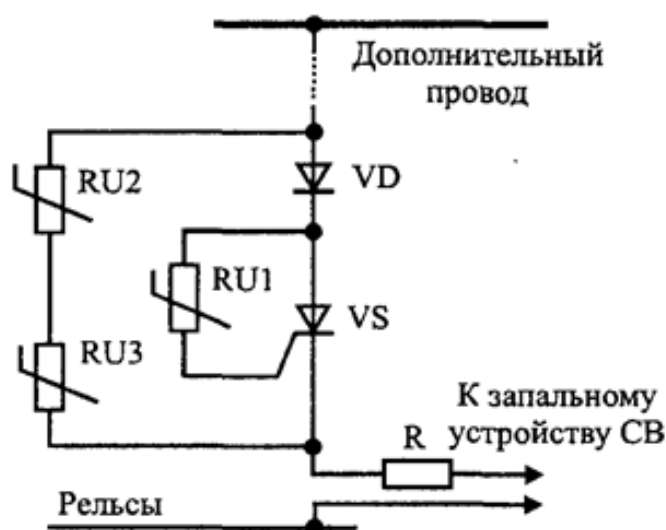


Рисунок 1.6 – Упрощенная схема входного устройства короткозамыкателя

Блок добавочных сопротивлений  $R$  служит для ограничения тока в дополнительном проводе и запальном устройстве короткозамыкателя  $QN$ . Ток срабатывания запального устройства равен 4 – 6 А.

К достоинствам защиты можно отнести снижение коррозии металлической арматуры и фундаментов опор, вызванной стеканием блуждающих токов из рельсовой цепи или перетекающими токами в тросах группового заземления, возможность использования дополнительного провода малого сечения большой длины за счет ликвидации возможности утечек тока через опоры. К недостаткам относится необходимость заменять время от времени искровые промежутки после их сраба-

тивания и трудоемкость диагностирования их состояния, дополнительные затраты средств, времени и труда на обслуживание защит, расположенных на перегонах. Это реализуется с помощью содержания специальной группы специалистов в дистанции электроснабжения.

#### **1.4 Анализ зарубежных систем заземления на железнодорожном транспорте**

На сегодняшний день основной тенденцией развития электрических железных дорог в мире является высокоскоростной железнодорожный транспорт. В этом отношении наша страна значительно отстает от таких стран как Германия, Италия, Франция, Япония и Китай, где на сегодняшний день успешно эксплуатируются высокоскоростные железнодорожные линии. Таким образом, очень важно использовать опыт эксплуатации зарубежных высокоскоростных железных дорог для более продуктивного их внедрения на территории нашей страны.

Для начала необходимо отметить основные отличия электрифицированных железных дорог России и западных стран. Сегодня в России в эксплуатации остается достаточно обширный полигон железных дорог электрифицированных на постоянном токе, в то время как в странах Евросоюза системы электроснабжения постоянного тока используются в основном в метро и на пригородных линиях и считаются устаревшими. Однако, несмотря на небольшую распространенность железных дорог постоянного тока, в европейских странах достаточно серьезно относятся к проблеме электрокоррозионного влияния электрифицированных железных дорог на подземные сооружения, такие как газо- и нефтепроводы, кабели, а также на сооружения инфраструктуры самих железнодорожных линий.

Основным документом, регламентирующим работу железных дорог стран Евросоюза, является директива 2008/57/ЕС [88] о функциональной совместимости железных дорог внутри Евросоюза. На основании этого документа составляются

так называемые технические требования к эксплуатационной совместимости (в оригинале *TSI*), которые можно сопоставить с отечественными инструкциями ЦЭ. Наиболее интересным является *TSI 50122*, регламентирующий электробезопасность, заземление и обратные контуры. Он состоит из трех частей:

– *TSI 50122–1* – Защитное оборудование от поражения электрическим током [89].

– *TSI 50122–2* – Оборудование, направленное против влияния блуждающих токов, создаваемых железными дорогами постоянного тока [90].

– *TSI 50122–3* – Взаимное влияние железных дорог постоянного и переменного тока [91].

Согласно этим документам на железных дорогах стран Евросоюза в целях снижения величины блуждающих токов, создаваемых железными дорогами постоянного тока, ни одна конструкция, установка или сооружение, не изолированные от земли, не должны быть связаны с обратным контуром. Здесь следует отметить, что по этим же документам к обратному контуру относится не только рельсовая сеть, но и дополнительные обратные проводники. Эти проводники прокладываются параллельно рельсам и соединяются с ними через определенный интервал.

Для нашей страны наиболее актуальными будут являться системы, применяемые на железных дорогах постоянного тока. К таким системам относятся следующие:

- Система «глухого» заземления.
- Изолированная система.
- Система диодного и тиристорного заземления.
- Система дренажных слоев.

**Система «глухого» заземления.** Схема этой системы представлена на рисунке 1.7. Отрицательный полюс каждой подстанции заземляется на отдельную заземляющую сетку, минуя любые сопротивления в контуре заземления. Обратный контур, создаваемый ходовыми рельсами, действительно становится параллельным с землей, при этом значительная часть обратного тока может протекать

через землю, повышая угрозу коррозии подземных конструкций вблизи от путей [92,93].

Стоит отметить, что данная система считается устаревшей и на современных линиях не применяется.

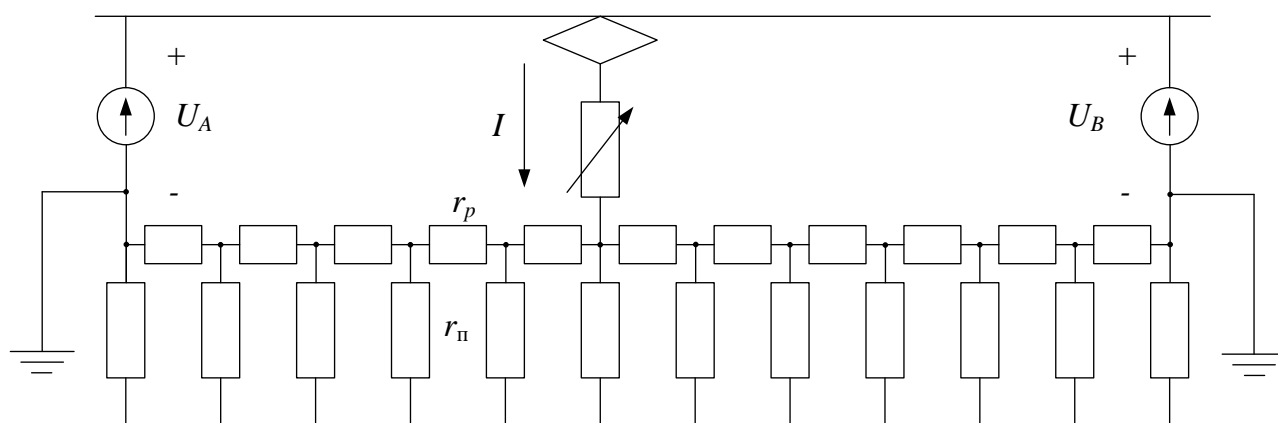


Рисунок 1.7 – Схема системы «глухого» заземления

**Изолированная система.** Эта система отличается от предыдущей только тем, что отрицательный полюс подстанции отдельно не заземляется. Эта система характеризуется меньшей величиной блуждающих токов, однако при этом наблюдается повышенный потенциал рельсов по отношению к земле, что может быть опасно для обслуживающего персонала. Данная система также считается устаревшей.

**Система диодного и тиристорного заземления.** В системе диодного заземления соединение между землей и отрицательной шиной на тяговой подстанции осуществляется через диодный блок. Диоды ограничивают напряжение рельсов короткозамкнутым контуром для обратного тока на тяговой подстанции при превышении обратного напряжения диода. Диод также обеспечивает низкоомный обратный контур при коротком замыкании между токоведущими частями и заземленной шиной на подстанции.

Последние практические и теоретические исследования показали, что применение системы диодного заземления может привести к большому напряжению прикосновения и повышению токов утечки в некоторых случаях [92,93].

Система тиристорного заземления использует автоматический заземляющий переключатель, который состоит из контролирующего постоянный ток и потенциал контуров и двух тиристоров, соединенных для обеспечения двунаправленного контроля тока, протекающего между «минус» шиной и землей. Тиристоры расположены в заземляющей системе тяговой подстанции. Когда потенциал рельса превышает заданное напряжение, соответствующий тиристор (в зависимости от полярности) будет открываться и соединять «минус» шину с землей. Открытый тиристор будет продолжать проводить ток, пока он не снизится до нуля или пока полярность напряжения, прикладываемого к тиристорам, не изменится на обратную. При закрытии тиристора, система становится изолированной, что ограничивает токи утечки. Выбор соответствующего уровня напряжения открытия тиристора значительно зависит от характеристик самой схемы. Для компромисса между безопасностью персонала и защитой от электрокоррозии, следует выбирать среднее значение. Использование низкого значения напряжения делает характеристики схемы тиристорного заземления близкими к системе глухого заземления. С другой стороны, выбор завышенного значения напряжения делает ее более близкой к изолированной схеме.

**Система дренажных слоев.** Соответствующая схема представлена на рисунке 1.8.

Эта система основана на использовании вдоль железнодорожной линии специальных дренажных слоев, расположенных под землей вдоль оси пути. Дренажным слоем является обычная заземляющая сетка. Каждый дренажный слой соединяется с соседним, а слои, расположенные у подстанций, дополнительно подключаются через диодный блок к отрицательному полюсу каждой подстанции. Кроме того, отрицательный полюс подстанций также соединяется с землей через диодный блок. Стоит отметить, что в качестве дренажных слоев можно использовать железобетонные конструкции пути.

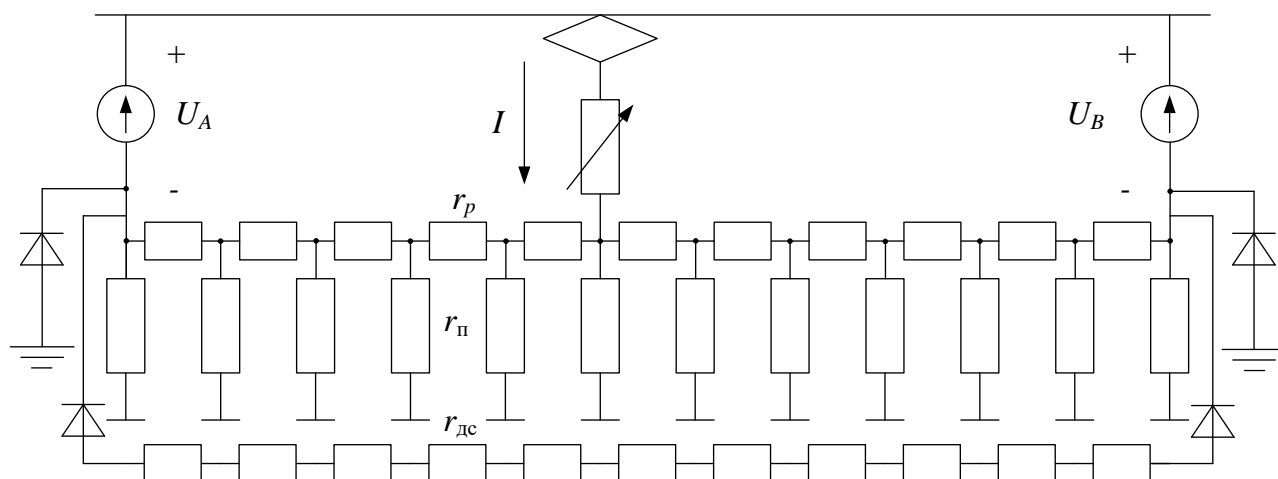


Рисунок 1.8 – Схема системы дренажных слоев

Эта система позволяет не только защищать подземные металлические сооружения, но и защищать сами дренирующие слои.

На переменном токе, согласно *TSI 50122–1* [89], в целях защиты от косвенного прикосновения, применяется соединение конструкций с рельсом или обратным проводом. На постоянном токе, согласно стандарту *TSI 50122–2* [90], соединение конструкций с обратным контуром разрешается только в случае их изоляции от земли. В нашей стране также практикуется использование рельсов для целей защитного заземления, однако у нас не используются дополнительные обратные проводники.

Учитывая указанные требования европейских стандартов, интересным видится система заземления, реализованная на высокоскоростной линии *SUI – YU* в Китае электрифицированной по системе 25 кВ. Система носит аббревиатуру *IGL* (*integrated grounding line*), что можно перевести как встроенная заземляющая линия [93, 94]. *IGL* представляет собой голый медный провод марки *TD – 70* мм<sup>2</sup>, проложенный вдоль пути. При этом он разделяется на секции и подключается к нейтральным точкам дроссель–трансформаторов через каждые 1000 м. Все заземляемые конструкции, расположенные вдоль железной дороги, соединяются с *IGL*.

Схема системы с применением *IGL* представлена на рисунке 1.9. При этом также применяется обратный провод.

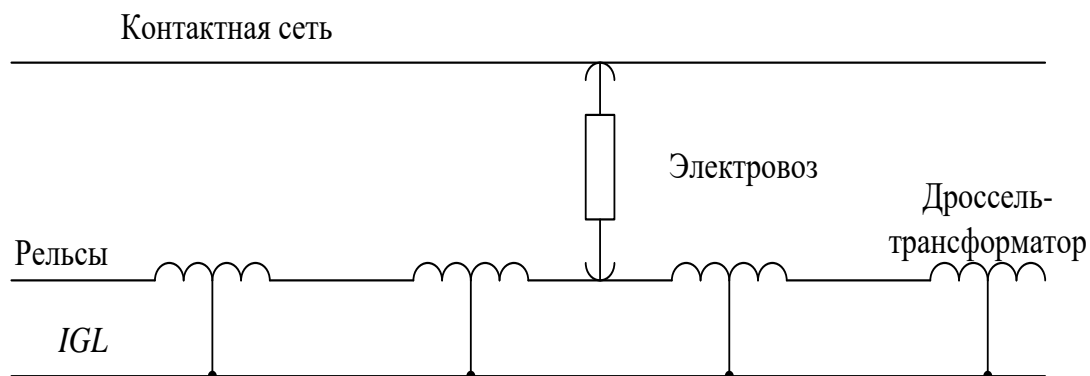


Рисунок 1.9 – Схема соединения *IGL* с рельсовой сетью

В работе [94] представлены результаты экспериментов по применению *IGL* на линии *SUI – YU*, которые показали, что применение этой системы способствует снижению потенциала рельсов почти на треть. Но более интересен вывод о том, что с увеличением протяженности *IGL* снижается ее активное продольное сопротивление, но при этом наблюдается рост реактивного сопротивления. При протяженности *IGL* более 3 км активное и реактивное сопротивления стремятся к некому установившемуся значению на уровне 0,4 Ом.

Интересным также является система заземления, применяемая на железнодорожной линии между Туринном и Новарой в Италии [96]. Этот участок электрифицирован по системе 2x25 кВ переменного тока 50 Гц. Эта система включает в себя не только протяженный подземный заземлитель, но и заземляющий провод, которые с интервалом 1500 м присоединяются к нулевой точке дроссель-трансформаторов рельсовой сети. Заземляющий провод и подземный заземлитель соединяются между собой через каждые 750 м. Кроме того каждая опора присоединяется и к воздушному заземляющему проводу, и к протяженному подземному заземлителю. Схема поперечного сечения, описываемой системы заземления, представлена на рисунке 1.10 [96].

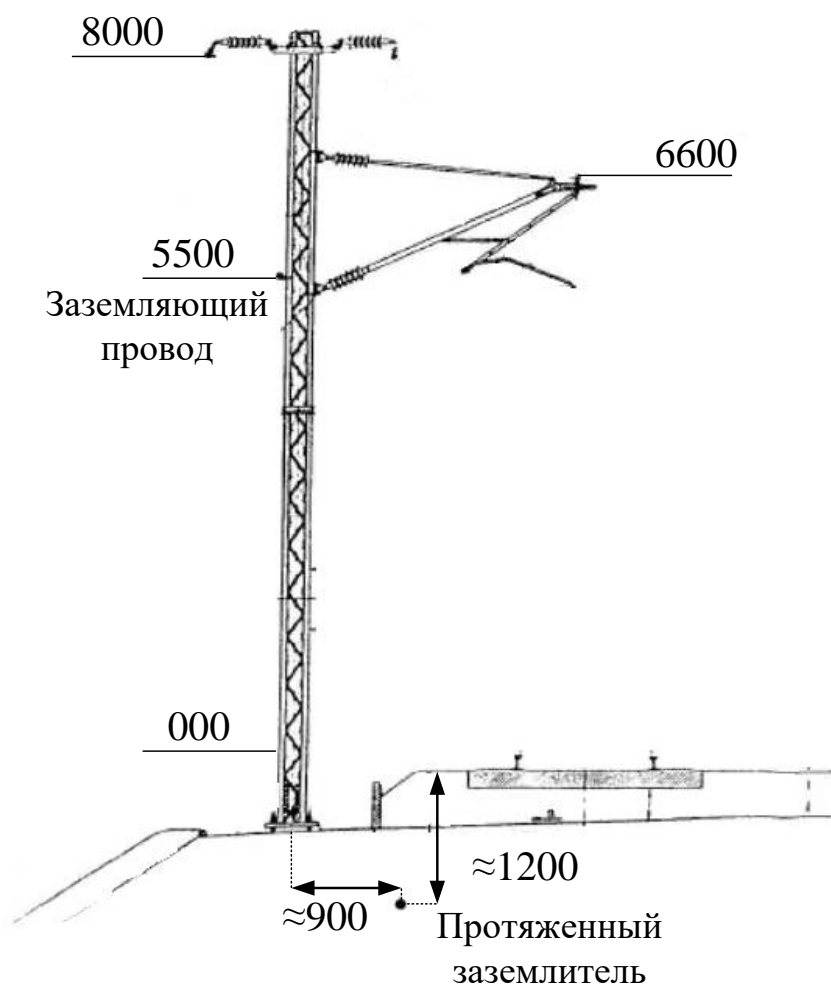


Рисунок 1.10 – Поперечное сечение системы тягового электроснабжения переменного тока 2x25 кВ, расположенного на насыпи, участка Турин – Новара

Похожая система описывается в [97], где рассматриваются системы заземления на участках 2x25 кВ переменного тока 50 Гц в условиях короткого замыкания. В этой системе также используется подземный заземляющий кабель и заземляющий провод, к которым присоединяются опорные конструкции контактной сети.

И в том и в другом случае совместное использование заземляющего провода и протяженного заземлителя направлено на снижение результирующего электромагнитного поля электрифицированной железной дороги и на выравнивание по-



тенциала вокруг нее, что способствует снижению напряжения прикосновения к рельсам и к опорам контактной сети в режиме короткого замыкания.

## **1.5 Варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств**

Как было сказано выше, совмещение функций заземляющего устройства и проводника обратного тока в рельсовой сети имеет негативные последствия. Анализ отечественных систем защиты опор контактной сети и зарубежных систем заземления на железнодорожном транспорте показывает, что одним из перспективных направлений в области совершенствования заземляющих устройств является использование протяженных заземлителей различной конструкции.

Основной идеей протяженного заземляющего устройства является отказ от заземления железобетонных конструкций на участках постоянного тока на рельсовую сеть. Основным преимуществом в этом случае будет снижение электрической коррозии арматуры железобетонных конструкций, вызванной протеканием тока из рельсов через саму конструкцию в землю. Такой процесс наблюдается в так называемых «анодных» зонах – зонах, где потенциал рельсов положительный. Отключение конструкций от рельсов ликвидирует указанный путь протекания тока, однако при этом образуется другой – ток может протекать от заземлителя через конструкции в землю. В этом случае необходимо, чтобы потенциал заземлителя оставался отрицательным, что обеспечит катодную поляризацию конструкций, соединенных с ним. При катодной поляризации, т.е. преднамеренном снижении потенциала сооружения ниже уровня нуля, процессы электрической коррозии останавливаются и вновь не возникают. Чем ниже будет уровень потенциала сооружения, тем устойчивей поляризация и тем эффективней защита конструкций.

Исходя из описанных выше моментов, были предложены несколько вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств, отличающихся видом протяженного заземлителя:

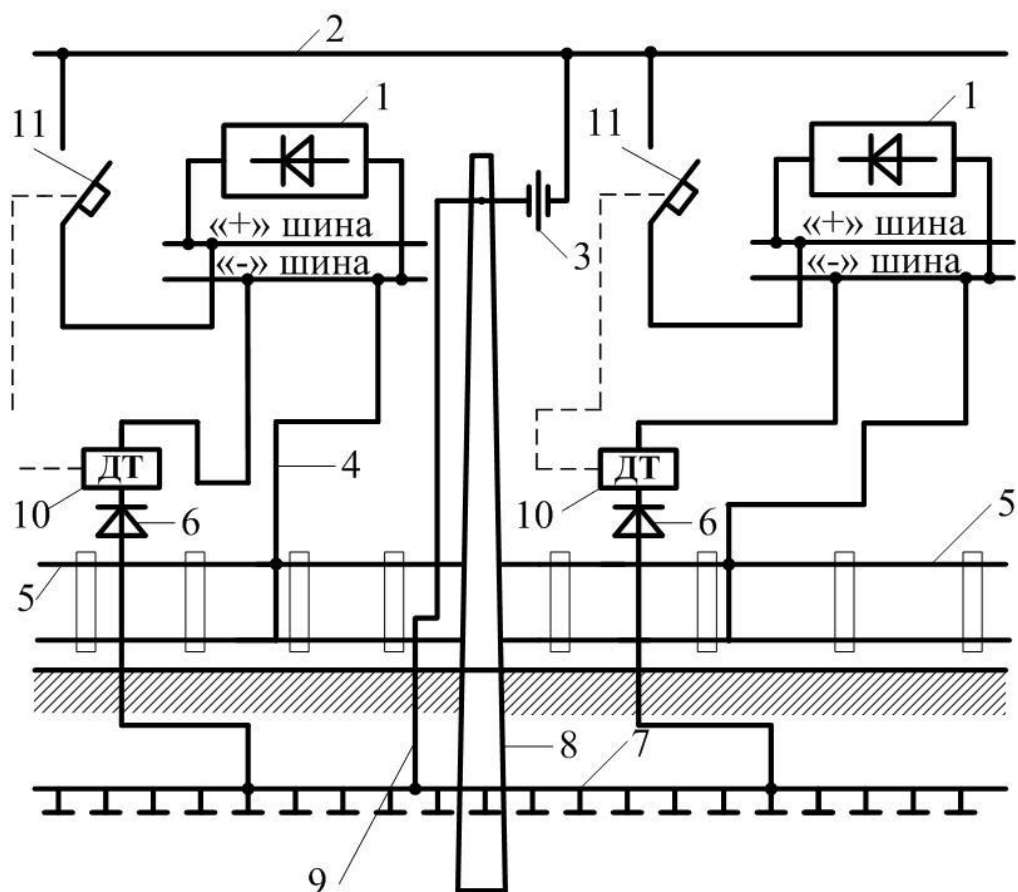
- вариант с применением горизонтального заземляющего электрода;
- вариант с применением комбинированного заземлителя;
- вариант с применением заземляющего провода.

Вариант с применением горизонтального заземляющего электрода является основным исходным вариантом и представляет собой совершенствование протяженного заземляющего устройства, разработанного в УрГУПС [15]. Основным конструктивным изменением является способ подключения заземлителя к отрицательному полюсу источника электроснабжения. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 1.11 [98-102].

Конструкция заземляющего устройства предполагает присоединение железобетонных конструкций непосредственно к протяженному заземлителю. Присоединение осуществляется на уровне пяты консоли, либо через диагностический вывод арматуры опор.

Подключение заземляющего устройства осуществляется к «-» шине тяговой подстанции, через датчик тока и полярирующий диодный блок. Основная функция датчика тока – измерение тока в заземлителе в месте подключения к тяговой подстанции. Информация о величине тока заземлителя поступает в блок управления быстродействующим выключателем, который отстраивается на отключение выключателя при определенном значении тока заземлителя. Полярирующий диодный блок предназначен для предотвращения протекания тока из «-» шины тяговой подстанции к заземлителю при прохождении поездов вблизи места подключения к «-» шине.

Заземлитель выполняется из стальной арматуры диаметром 12 мм и располагается на расстоянии 4 м от оси пути на глубине 0,7 м.



1 – тяговая подстанция постоянного тока; 2 – контактная сеть; 3 – изоляция контактной сети; 4 – фидер обратного тока тяговой подстанции; 5 – рельсовая сеть; 6 – полярирующие диодные блоки; 7 – горизонтальный заземляющий электрод; 8 – опорные конструкции; 9 – заземляющий проводник; 10 – датчик тока протяженного заземлителя; 11 – быстродействующий выключатель контактной сети.

Рисунок 1.11 – Схема протяженного заземляющего устройства опор контактной сети с применением горизонтального заземляющего электрода

К основным достоинствам представленного варианта конструктивного исполнения можно отнести:

- 1) осуществление защиты фундаментов, опор контактной сети и других подземных сооружений, присоединенных к протяженному заземлителю, от электрической коррозии;
- 2) уменьшение трудоемкости работ по ремонту железнодорожных путей за счет устранения присоединений к рельсовому пути;
- 3) повышение надежности работы рельсовых цепей автоблокировки;

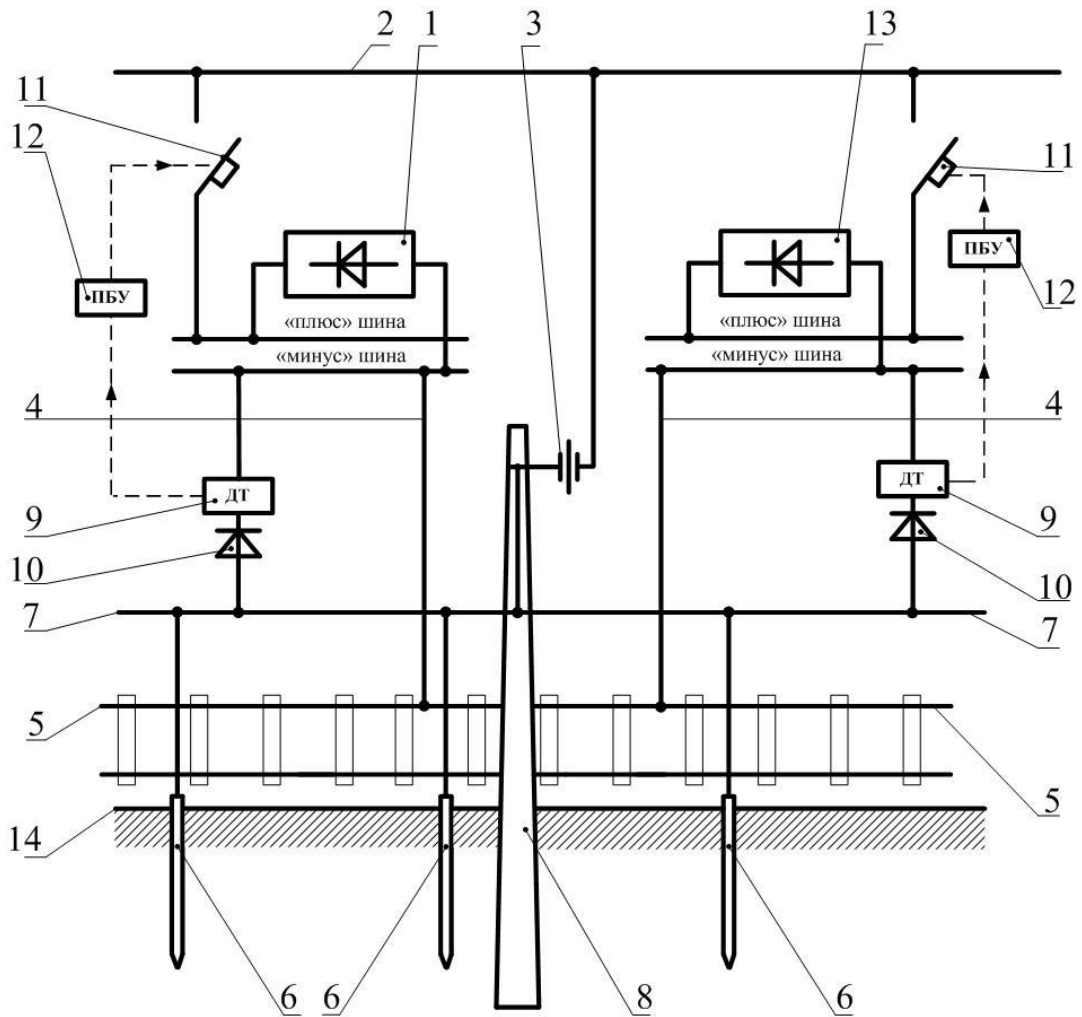
4) осуществление защиты заземляющего устройства опор контактной сети от проявлений «вандализма».

Главными недостатками данного варианта исполнения является неустойчивая катодная поляризация присоединяемых к заземляющему устройству конструкций за счет взаимного влияния рельсовой сети и заземлителя друг на друга, а также необходимость значительных материальных затрат на монтаж устройства. Затраты в основном связаны с большим объемом земляных работ, поскольку в соответствии с рисунком 1.11 заземлитель располагается по всему участку от одной тяговой подстанции до другой. Результаты расчетов, подтверждающие неустойчивость поляризации для конкретного участка Свердловской дороги «Сарга»–«Сабик», на котором осуществляется тяжеловесное движение, приведены в главе 4.

Исходя из указанных недостатков варианта с применением горизонтального заземляющего электрода, был разработан вариант конструктивного исполнения с применением комбинированного заземлителя [103].

Комбинированный заземлитель включает в себя вертикальные заземляющие электроды, располагаемые на определенном расстоянии друг от друга. В свою очередь, они объединяются металлическим заземляющим проводником, располагаемым на опорах контактной сети с полевой стороны. В дальнейшем этот проводник будет называться заземляющим проводом. В качестве заземляющего провода используется провод марки ПБСМ–70. Вертикальные заземляющие электроды располагаются на расстоянии 500 м друг от друга и выполняются из стальной арматуры диаметром 12 мм.

При использовании комбинированного заземлителя в целом по длине рассматриваемого участка переходное сопротивление «заземлитель – земля» будет равно бесконечности, так как заземляющий провод отделен от земли воздухом, представляющим собой диэлектрик. В этом случае для тока возможны два пути утечки: через сопротивление вертикальных электродов, либо через сопротивление опор, которые, согласно рисунку 1.12, напрямую связаны с заземляющим проводником.



1 – тяговая подстанция постоянного тока, 2 – контактная сеть, 3 – изоляция контактной сети, 4 – рельсовый фидер тяговой подстанции, 5 – рельсовая сеть, 6 – вертикальный электрод, 7 – металлический заземляющий провод, 8 – опоры контактной сети, 9 – датчик тока, 10 – полярирующие диодные блоки, 11 – быстродействующий выключатель, 12 – программируемый блок управления, 13 – смежная подстанция, 14 – уровень поверхности земли.

Рисунок 1.12 – Схема протяженного заземляющего устройства опор контактной сети с применением комбинированного заземлителя

Основными преимуществами варианта конструкции заземляющего устройства с применением комбинированного заземлителя является уменьшение количества земляных работ. Монтаж вертикального электрода в нескольких местах участка стоит гораздо дешевле и занимает меньше времени, чем монтаж горизонтального электрода по всей длине участка. При этом нет необходимости закрывать движение по участку на время земляных работ. Все основные преимущества,

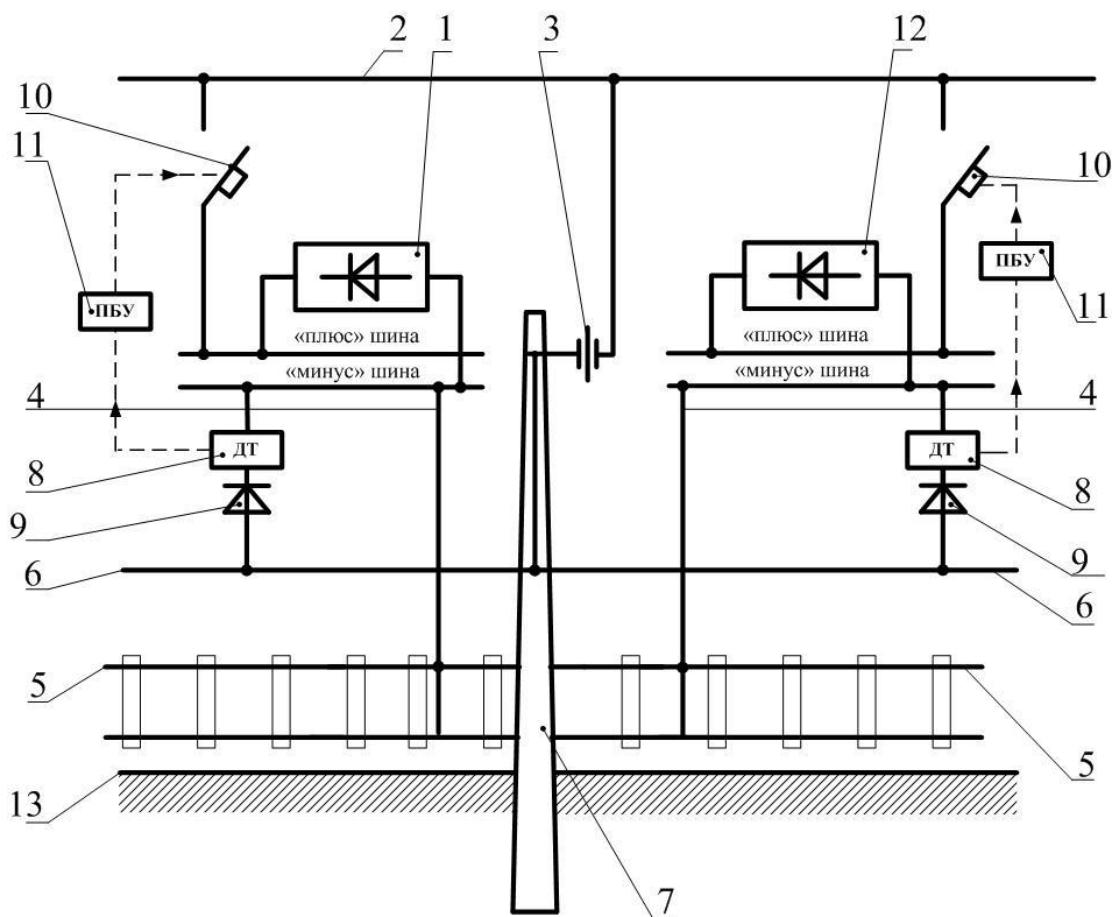
указанные для варианта с горизонтальным электродом, справедливы и для варианта с комбинированным заземлителем. Исключение составляет только защищенность от проявлений «вандализма»: заземляющий проводник располагается на опорах с полевой стороны и может быть поврежден в корыстных целях.

Отсутствие распределенной связи между заземляющим проводом и рельсовой сетью приведет к уменьшению их взаимного влияния друг на друга, прямым следствием чего будет снижение потенциала заземляющего провода. Иными словами, будет повышена устойчивость катодной поляризации защищаемых сооружений. В этой ситуации, устойчивость поляризации будет напрямую зависеть от сопротивления растеканию вертикальных электродов и сопротивления присоединенных к заземляющему проводу опор. Чем выше будут эти сопротивления, тем ниже будет потенциал провода и тем устойчивее будет поляризация и наоборот. Кроме того, расстояние между вертикальными электродами также будет влиять на устойчивость поляризации: чем ближе друг к другу будут расположены электроды, тем большее их число будет помещаться на всей длине участка, и тем больше тока будет протекать через них в целом.

Исходя из указанных выше особенностей конструкции варианта с применением комбинированного заземлителя, был предложен вариант с применением только заземляющего провода [104].

В качестве заземляющего провода также используется провод ПБСМ–70.

Как видно из рисунка 1.13 при использовании заземляющего провода в конструкции заземляющего устройства отсутствуют какие-либо элементы, связанные с землей. Такое решение позволило повысить устойчивость катодной поляризации заземляющего провода. Однако, как и в предыдущем случае, остается путь утечки тока из заземляющего провода через сопротивление опор контактной сети. От сопротивления опор будет зависеть величина стекающего тока и соответственно устойчивость поляризации.



1 – тяговая подстанция постоянного тока, 2 – контактная сеть, 3 – изоляция контактной сети, 4 – рельсовый фидер тяговой подстанции, 5 – рельсовая сеть, 6 – металлический заземляющий провод, 7 – опоры контактной сети, 8 – датчик тока, 9 – полярирующие диодные блоки, 10 – быстродействующий выключатель, 11 – программируемый блок управления, 12 – смежная подстанция, 13 – уровень поверхности земли.

Рисунок 1.13 – Схема протяженного заземляющего устройства опор контактной сети с применением заземляющего провода

Основным преимуществом последнего варианта исполнения является полное исключение земляных работ. За счет этого будет значительно снижены капитальные расходы на монтаж устройства, включающего только заземляющий провод.

### Выводы по первой главе:

1) Использование рельсов и земли в качестве питающего полюса при электроснабжении локомотивов электрической тяги постоянного тока вызывает длительное протекание высоких уровней постоянных токов в земле, что приводит к

интенсивной электрической коррозии фундаментов и подземных частей опор контактной сети.

2) На сегодняшний день разработано множество систем защиты опор контактной сети от электрической коррозии: потенциальная защита Донецкой железной дороги, мгновенная потенциальная защита, защита опор, изолированных от рельсов. Указанные системы имеют существенные недостатки, которые не позволяют внедрить их на сети дорог.

3) Анализ иностранных источников показал, что в странах Европы большое внимание уделяют проблеме электрокоррозии на участках постоянного тока. Наиболее перспективной среди зарубежных систем можно считать систему, основанную на совместном использовании протяженного подземного заземлителя и заземляющего проводника, которая применяется на участке Турин – Новара в Италии.

4) На основе результатов анализа отечественных и иностранных систем заземления и защиты опор было выявлено перспективное направление их развития, заключающееся в отказе от использования рельсовой сети в качестве заземляющего устройства. Основываясь на идее использования сторонних протяженных заземлителей, были разработаны варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств, имеющие функциональные особенности.



## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ И ТОКОВ В СИСТЕМАХ «РЕЛЬСЫ-ЗЕМЛЯ» И «РЕЛЬСЫ-ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ»**

### **2.1 Исследование электрических параметров опор контактной сети**

Протяженное заземляющее устройство предполагается использовать на действующих участках с целью повышения срока службы железобетонных опор, которые подвержены электрической коррозии на участках постоянного тока. Конструкция заземляющего устройства предполагает присоединение опор напрямую к протяженному заземлителю, тем самым создается условие для протекания тока через тело опоры. Для того чтобы учитывать этот процесс при математическом моделировании системы «рельсы-протяженный заземлитель» необходимо знать сопротивление опоры с учетом ее сопротивления растеканию. Подключение опор к протяженному заземлителю может производиться с помощью диагностического вывода арматуры при его наличии, в противном случае необходимо подключать к протяженному заземлителю хомут консоли опоры. В этом случае, сопротивление опоры необходимо рассматривать от уровня пяты консоли до ее подземной части, либо до подземной части фундамента. Схема подключения опоры к заземлителю представлена на рисунке 2.1

Железобетонная опора включает в себя две основных части: бетон и металлический арматурный каркас. Бетон слабо проводит электрический ток, при этом его удельное сопротивление сильно зависит от его увлажненности. Арматура же выполняется из стали и в сравнении с бетоном является очень хорошим проводником электрического тока. В этом выражается особенность железобетонной опоры как проводника электрического тока, исходя из которой, на величину ее сопротивления будет влиять конфигурация арматурной сетки [105, 106]. Это также относится и к железобетонным фундаментам.

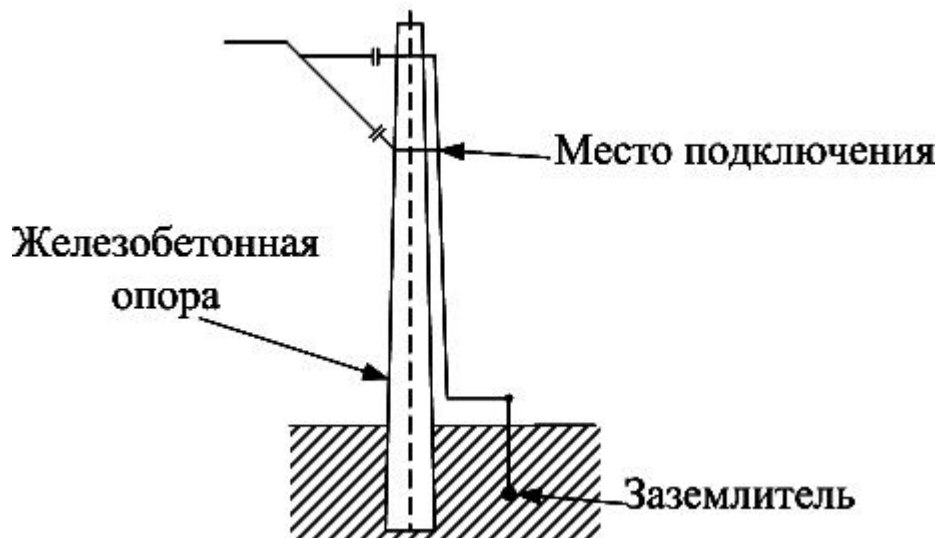


Рисунок 2.1 – Схема подключения железобетонной опоры

Очевидно, что полностью учесть форму арматурной сетки при исследовании железобетонной конструкции можно с помощью трехмерного моделирования. Наиболее эффективным методом исследования трехмерных моделей является метод конечных элементов, позволяющий рассчитывать модели сложной формы. Дальнейшее исследование железобетонных конструкций будет проводиться в программном комплексе *Comsol Multiphysics*.

На начальном этапе исследования важно оценить, в каких пределах изменится сопротивление железобетонной конструкции. Минимально возможным будет сопротивление арматурной сетки не покрытой бетоном, максимально возможным будет сопротивление конструкции без арматурной сетки. Таким образом, величина сопротивления может варьироваться от десятков Ом до сотен кОм.

Как было указано выше, опору, как проводник электрического тока, необходимо рассматривать сверху вниз: от пяты консоли до ее основания. Из соотношения удельных сопротивлений бетона и арматуры следует вывод, что большая часть тока будет протекать по арматурной сетке. Исходя из этого, длина опоры практически не будет влиять на ее сопротивление. Сопротивление опоры будет определять переходное сопротивление между наружным слоем бетона и арматурой вблизи места втекания или стекания тока. Учитывая вышесказанное, нет

необходимости рассматривать опору в 3D полностью, достаточно рассмотреть только зоны, где будет происходить втекание и стекание тока. В зависимости от типа опоры эти зоны будут различны. В подземной части опоры или фундамента происходит интенсивное стекание тока в землю, следовательно, для получения корректных результатов необходимо рассматривать в 3D всю подземную часть.

Из соотношения удельных сопротивлений бетона и арматуры вытекает еще одна особенность железобетонных конструкций как электрических проводников: при протекании тока потенциал арматуры практически не будет меняться по ее длине, т.е. поверхность арматуры будет эквипотенциальной [107]. При этом величина втекающего в арматурную сетку тока равна величине вытекающего из нее тока. Этот вывод будет использоваться при задании граничных условий для конечно-элементной модели.

Помимо железобетонных опор на участках электрифицированных железных дорог постоянного тока активно используются металлические опоры, устанавливаемые на железобетонные фундаменты. Если оценить сопротивление металлической опоры, то очевидно, что оно будет много меньше, чем сопротивление железобетонного фундамента. Таким образом, при оценке сопротивления металлической опоры с учетом ее сопротивления растеканию достаточно рассмотреть только железобетонный фундамент расположенный в земле.

Процесс протекания постоянного тока по железобетонной конструкции описывается системой уравнений, которая может быть применена к трехмерной модели

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{J}) &= 0 \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{E} &= -\operatorname{grad}(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где  $\vec{J}$  – вектор плотности электрического тока, А/м<sup>2</sup>;

$\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля В/м;

$\sigma$  – удельная электропроводность, См/м;

$\varphi$  – электрический потенциал, В.

Первое уравнение показывает, что в рассматриваемой области нет источников тока, второе – описывает зависимость между вектором плотности тока и вектором напряженности электрического поля, а третье – выражает потенциал, через вектор напряженности.

При моделировании необходимо задание граничных условий: необходимо задать зону внешнего потенциала и зону нулевого потенциала. Поскольку рассматривается трехмерная модель, то граничные условия задаются на поверхностях.

Помимо указанных условий необходимо задать условие эквипотенциальности арматуры  $\varphi = \varphi_{\text{арм}}$ . Это условие описывается выражением

$$\int_{S_{\text{арм}}} J_{\text{арм}}^n dS_{\text{арм}} = 0, \quad (2.2)$$

где  $S_{\text{арм}}$  – это внешняя поверхность арматуры, соприкасающаяся с бетоном, м<sup>2</sup>;

$J_{\text{арм}}^n$  – плотность тока по нормали к поверхности арматуры, А/м<sup>2</sup>.

Выражение (2.2) означает, что при потенциале арматуры  $\varphi_{\text{арм}}$  весь ток, втекающий в нее из бетона по всей поверхности их соприкосновения, равен току вытекающему обратно.

Применяя описанные граничные условия к любой железобетонной конструкции, можно получить распределение потенциалов в теле конструкции и в окружающей земле, на основе которого в дальнейшем будет определяться собственно сопротивление конструкции с учетом ее сопротивления растеканию.

Метод конечных элементов предполагает точное задание геометрии расчетной модели. При моделировании были рассмотрены несколько вариантов железобетонных конструкций: нераздельная железобетонная опора типа СС-136.6, раздельная опора СС-100.6 установленная в стаканый фундамент типа ТСС-4, фун-

дамент типа ТСА-4. Исходными данными являлись соответствующие проектные чертежи [114].

Геометрия расчетных моделей представлена на рисунках 2.2-2.4, на которых цифрами 1 и 2 обозначены поверхности задания нулевого потенциала (внешняя граница расчетной области) и внешнего потенциала, соответственно отличного от нуля. Форма поверхности 2 соответствует отпечатку хомута консоли на опоре. Окружающее пространство земли моделируется полусферой радиусом 5 м, исходя из предположения, что в этих пределах рассматриваемый участок земли имеет неизменное удельное сопротивление.

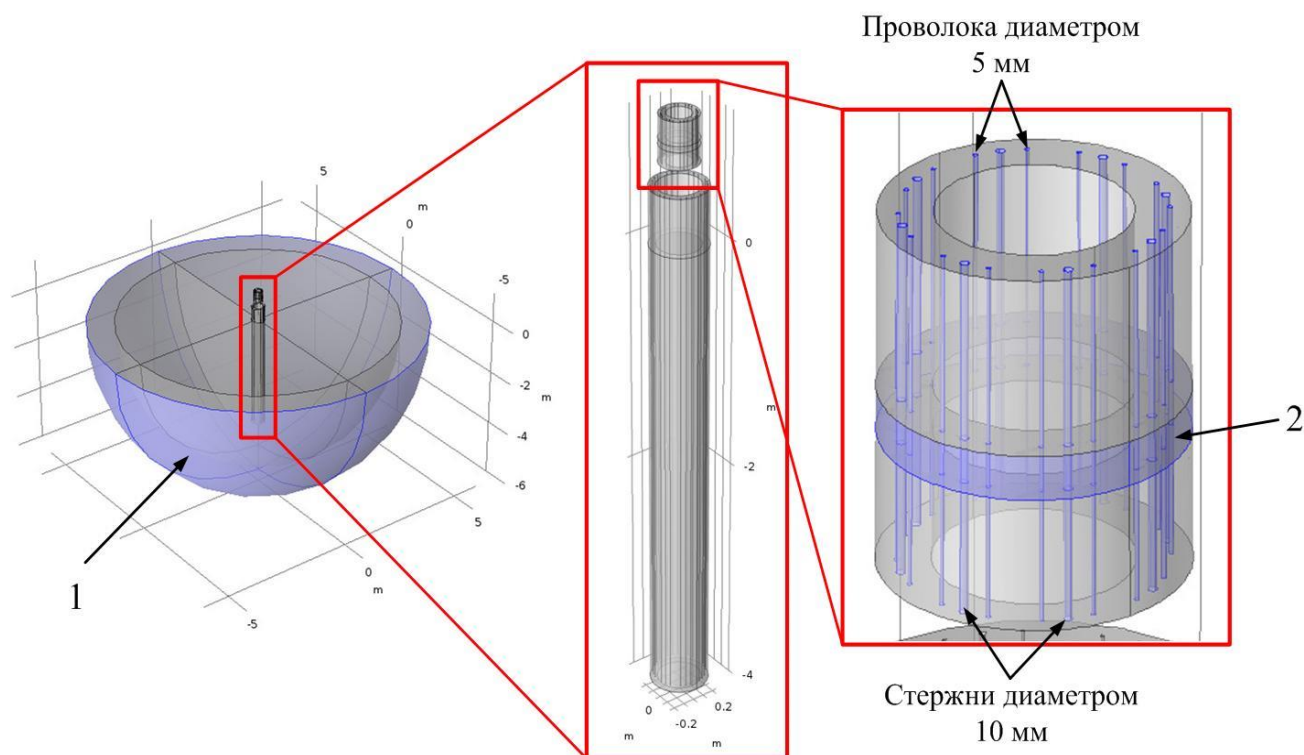


Рисунок 2.2 – Трехмерная геометрия нераздельной опоры СС-136.6, располагаемой в грунте

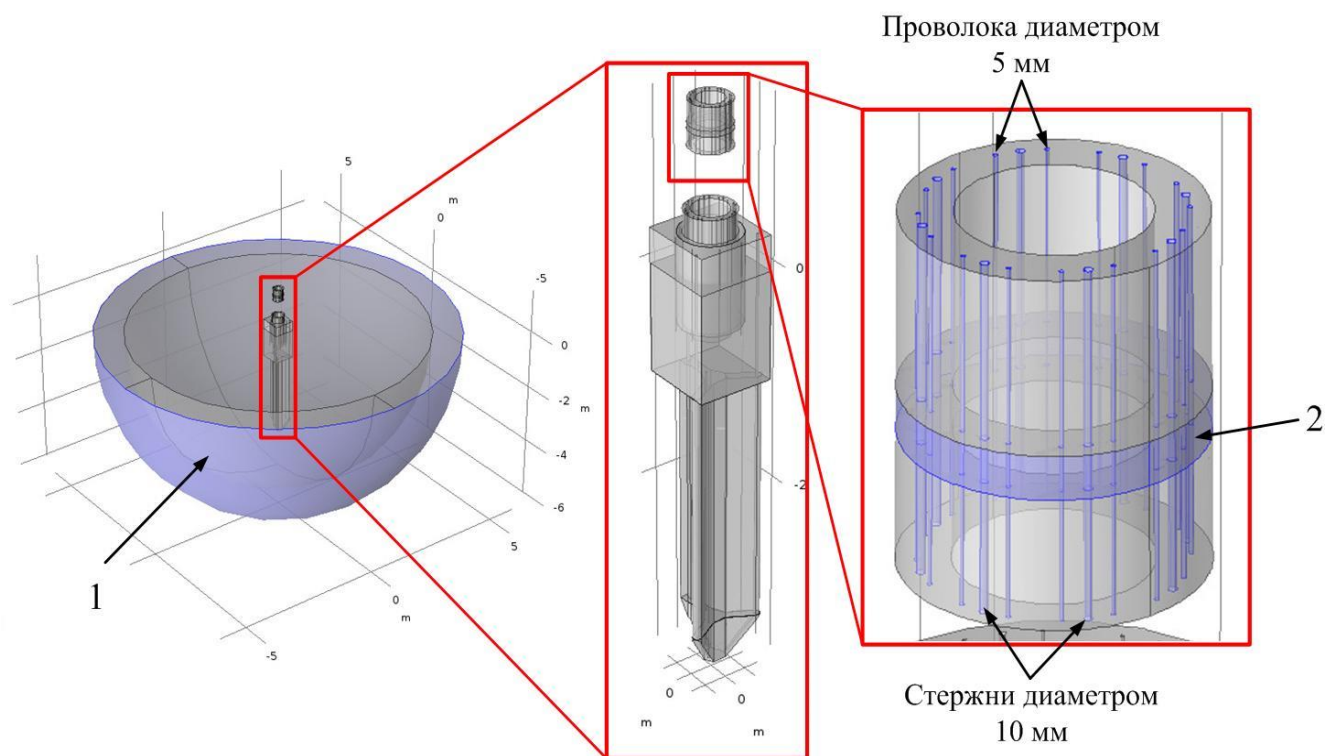


Рисунок 2.3 – Трехмерная геометрия отдельной опоры СС-100.6 с фундаментом ТСС-4, располагаемых в грунте

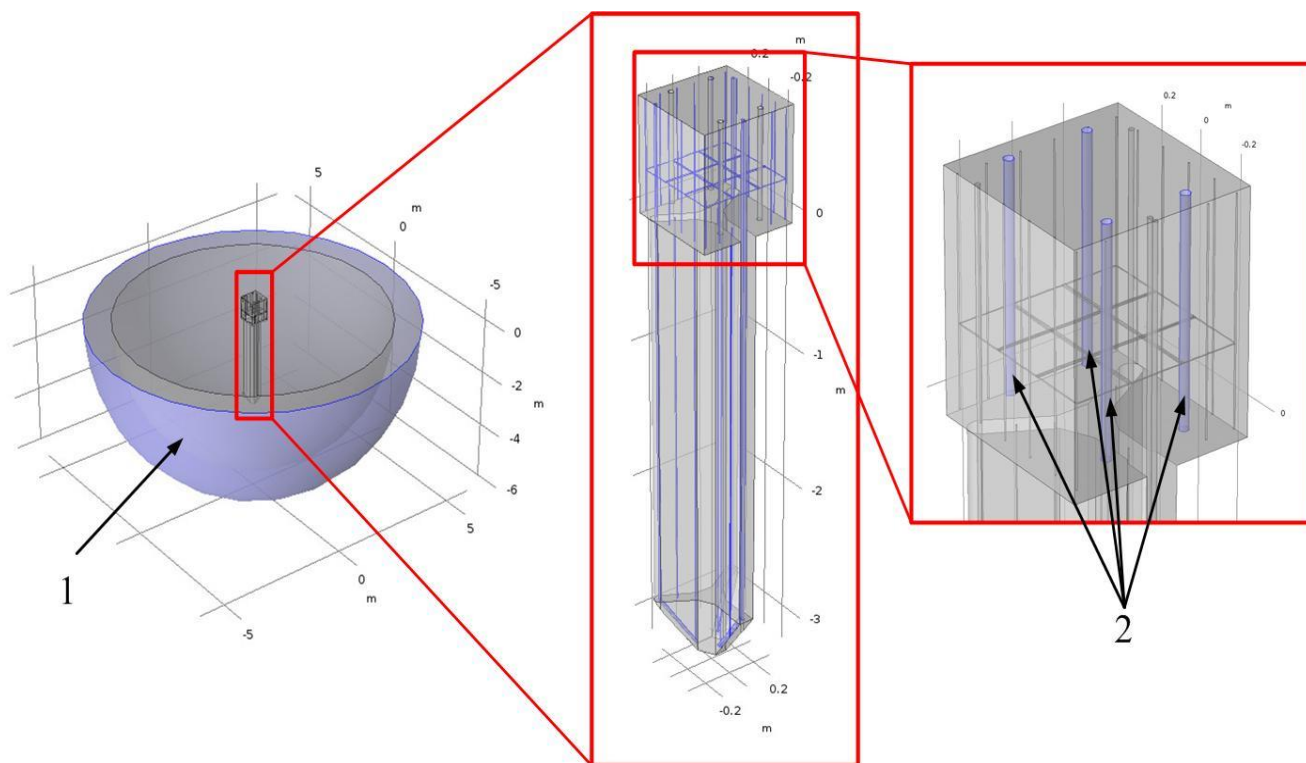


Рисунок 2.4 – Трехмерная геометрия фундамента ТСА-4, располагаемого в грунте

При создании трехмерных моделей опор и фундаментов была учтена конфигурация арматурных сеток этих конструкций. Раздельные и не раздельные опоры типа СС имеют в составе арматурной сетки два основных элемента: металлические стержни диаметром 10 мм и проволоку диаметром 5 мм. Также в сетке используется спиральная арматура, которая объединяет все вертикальные элементы в одну сетку. С точки зрения электротехники наличие спиральной арматуры приводит к тому, что все вертикальные стержни будут находиться под одним потенциалом, что позволяет применить условие (2.2) ко всем вертикальным элементам и исключить спиральную арматуру.

Арматура фундамента типа ТСС-4 включает себя вертикальные стержни диаметром 20 мм, а также вертикальную проволоку диаметром 5 мм. Вертикальные элементы объединяются горизонтальными и вертикальными сетками в единую конструкцию, что также позволяет применить ко всем вертикальным элементам единое условие (2.2). Особенность заключается в арматуре «стакана» фундамента, в которой применяется проволока диаметром 5 мм. Вертикальные элементы стакана объединены сеткой, следовательно, к ним также можно применить единое условие (2.2), однако оно будет независимо от остальной арматуры фундамента, поскольку арматура «стакана» не связана металлически с остальной арматурой.

Фундамент типа ТСА-4 по конструкции арматурной сетки схож с фундаментом типа ТСС-4. Отличие заключается в конструкции «оголовка» фундамента, поскольку в случае ТСА-4 там применяются анкерные болты, а также горизонтальные и вертикальные сетки из проволоки диаметром 5 мм. При этом арматура «оголовка» также металлически не связана с остальной арматурой фундамента, поэтому условие (2.2) для нее также задается независимо.

Результатом численного моделирования являются распределения потенциалов в теле железобетонной конструкции и в земле при различных значениях сопротивления бетона и грунта.

Бетон представляет собой сложную многокомпонентную структуру [2], удельное сопротивление которой зависит от многих факторов, наиболее важным

из которых является наличие влаги. Увлажнение приводит снижению сопротивления практически любых материалов. В отношении бетона наличие влаги снижает его сопротивление в десятки раз: сопротивление сухого бетона достигает значений 1000 Ом·м, при этом удельное сопротивление сильно увлажненного бетона может снижаться до 40 Ом·м.

Удельное сопротивление грунта также сильно зависит от наличия влаги. Кроме этого его величина меняется в течение года: зимой удельное сопротивление грунта в среднем выше, чем летом. Очевидна сильная неоднородность грунта не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскостях. Исходя из этого, в качестве исходных данных для задания удельного сопротивления грунта используются результаты вертикального электрического зондирования, приведенные в [115].

Необходимо определить значения сопротивлений железобетонных конструкций при различных величинах удельных сопротивлений грунта и бетона. Удельное сопротивление бетона будет варьироваться от 200 до 1000 Ом·м, сопротивление грунта – от 150 до 350 Ом·м.

Эпюры распределения потенциалов в теле железобетонных конструкций и в земле показаны на рисунках 2.5-2.7.

По полученным распределениям можно определить величину сопротивления рассматриваемых конструкций как отношение потенциала поверхности 2 (рисунки 2.2-2.4) к интегралу нормальной составляющей плотности тока по этой поверхности.

$$r_k = \frac{\varphi}{\iint_S J_S^n}, \quad (2.3)$$

где  $S$  – поверхность 2, на которой задается потенциал, отличный от 0;

$\varphi$  – потенциал поверхности 2, В;

$J_S^n$  – составляющая плотности тока, направленная по нормали к поверхности  $S$ , А/м<sup>2</sup>.



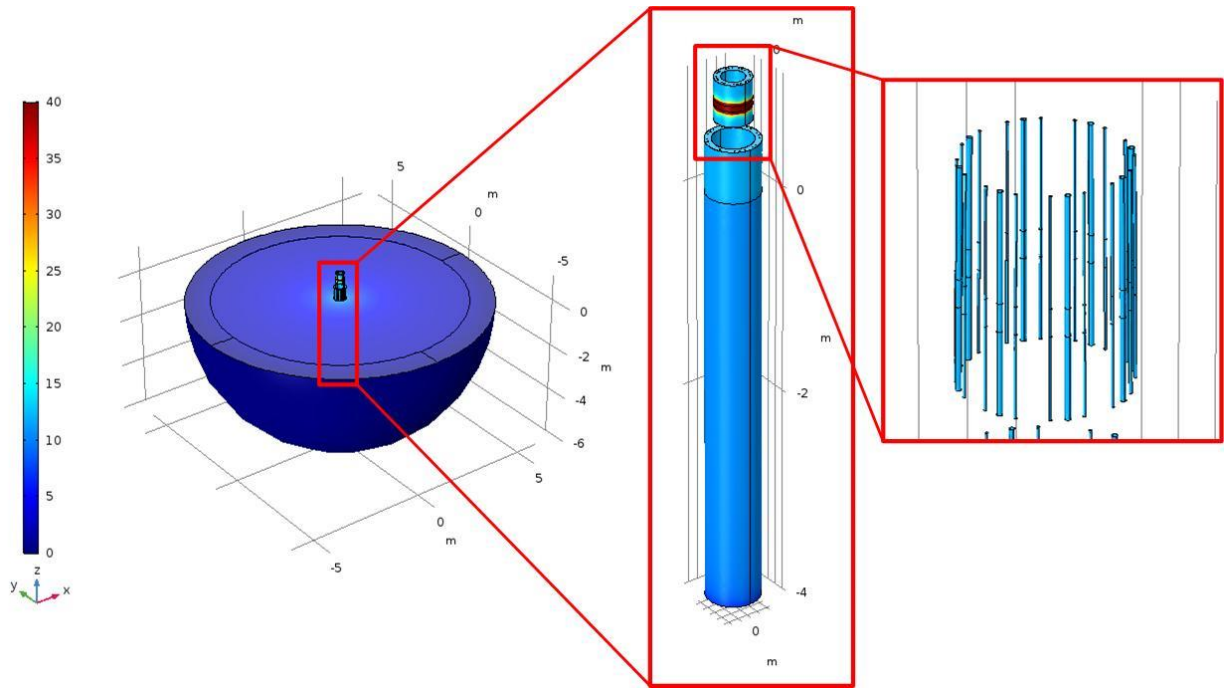


Рисунок 2.5 Распределение потенциала в земле и на поверхности нераздельной опоры СС-136.6 при удельном сопротивлении бетона  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и удельном сопротивлении грунта  $350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , цветовая шкала в вольтах

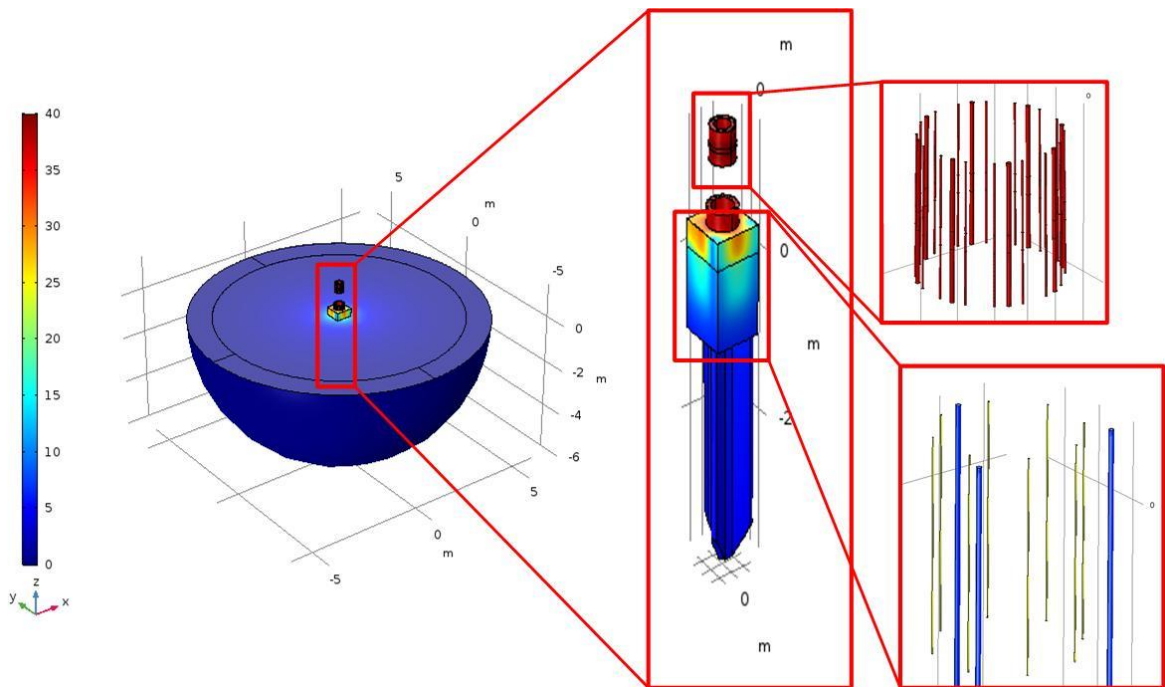


Рисунок 2.6 Распределение потенциала в земле и на поверхности отдельной опоры СС-106.6 при удельном сопротивлении бетона  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и удельном сопротивлении грунта  $350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , цветовая шкала в вольтах

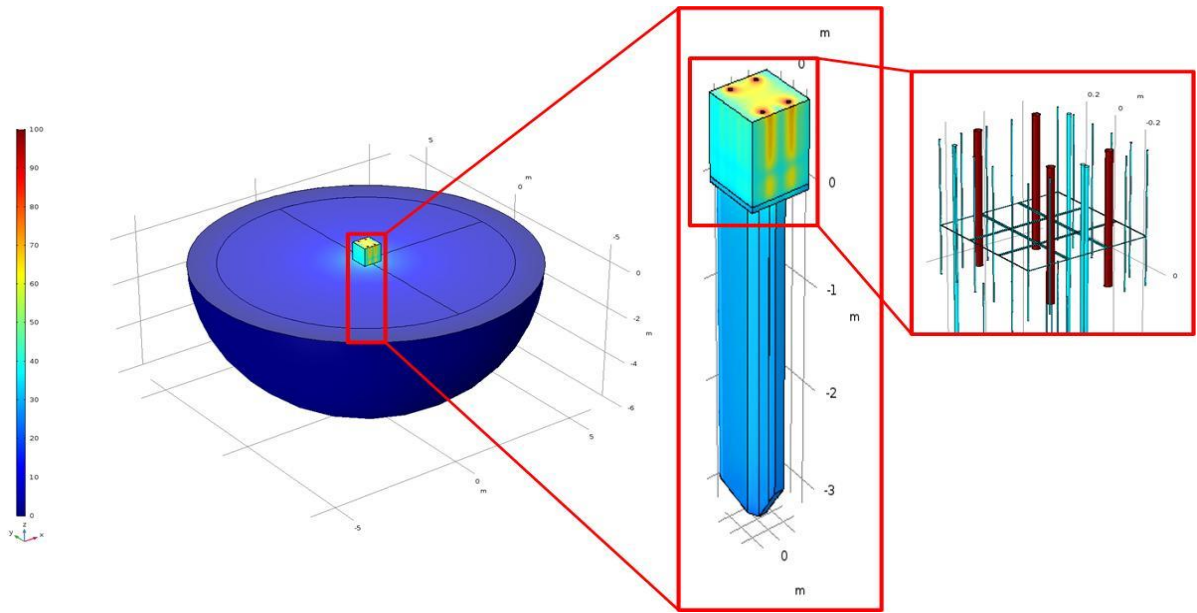


Рисунок 2.7 Распределение потенциала в земле и на поверхности фундамента типа ТСА-4 при удельном сопротивлении бетона 1000 Ом·м и удельном сопротивлении грунта 350 Ом·м, цветовая шкала в вольтах

На рисунках 2.8-2.10 приведены графики зависимости сопротивления рассмотренных железобетонных конструкций при различных значениях удельных сопротивлений грунта и бетона ( $r_{бет}$ ).

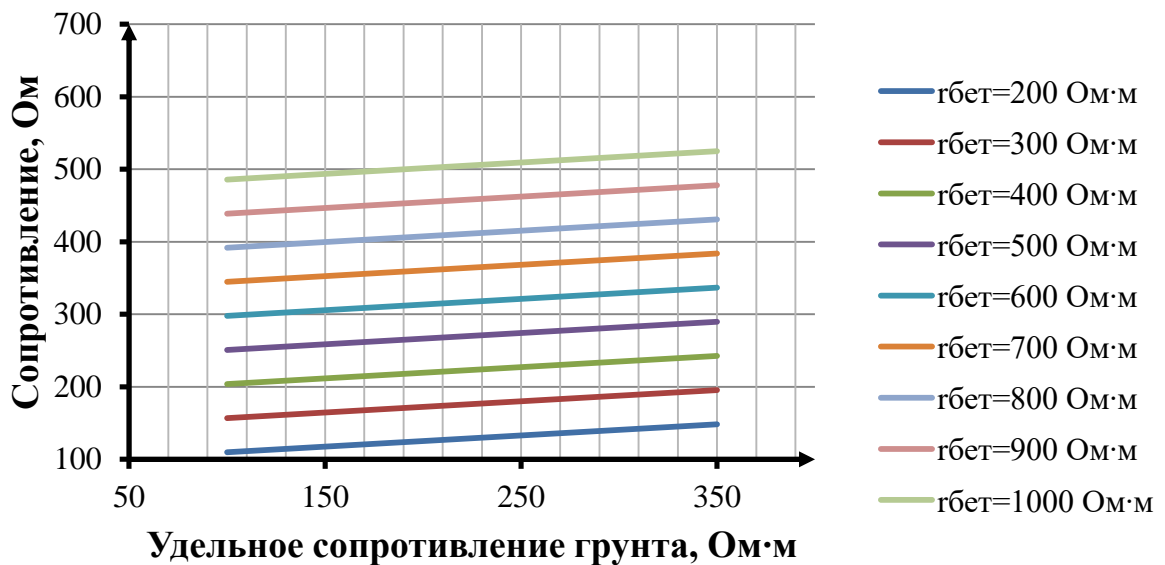


Рисунок 2.8 – Зависимость сопротивления нераздельной опоры СС-136.6 от удельных сопротивлений грунта и бетона

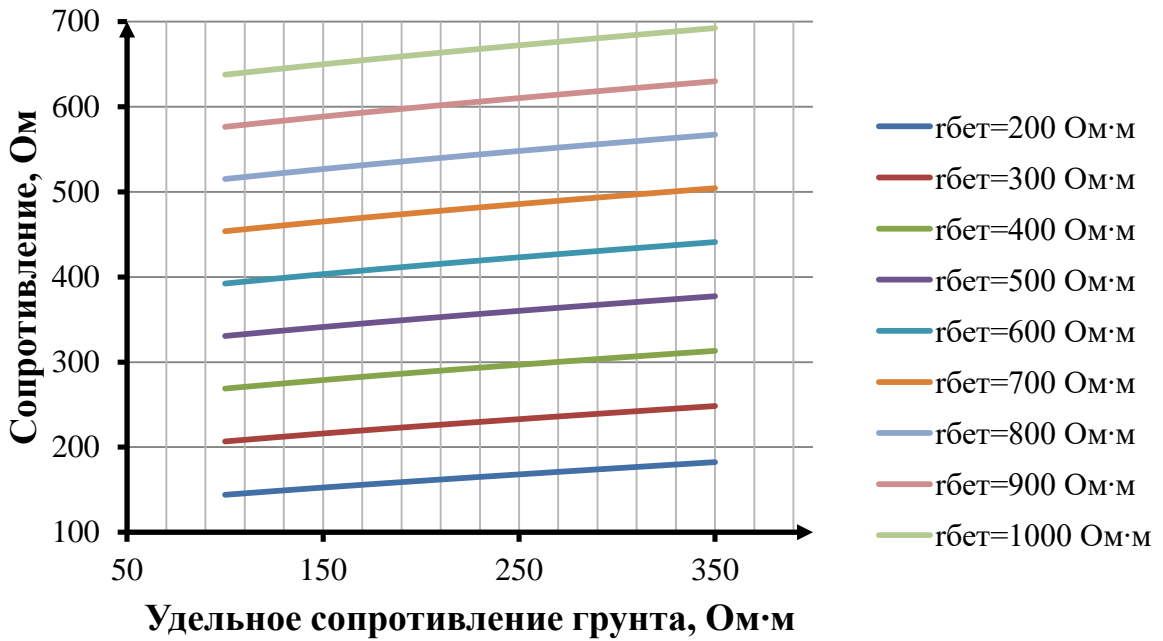


Рисунок 2.9 – Зависимость сопротивления раздельной опоры СС-106.6 от удельных сопротивлений грунта и бетона

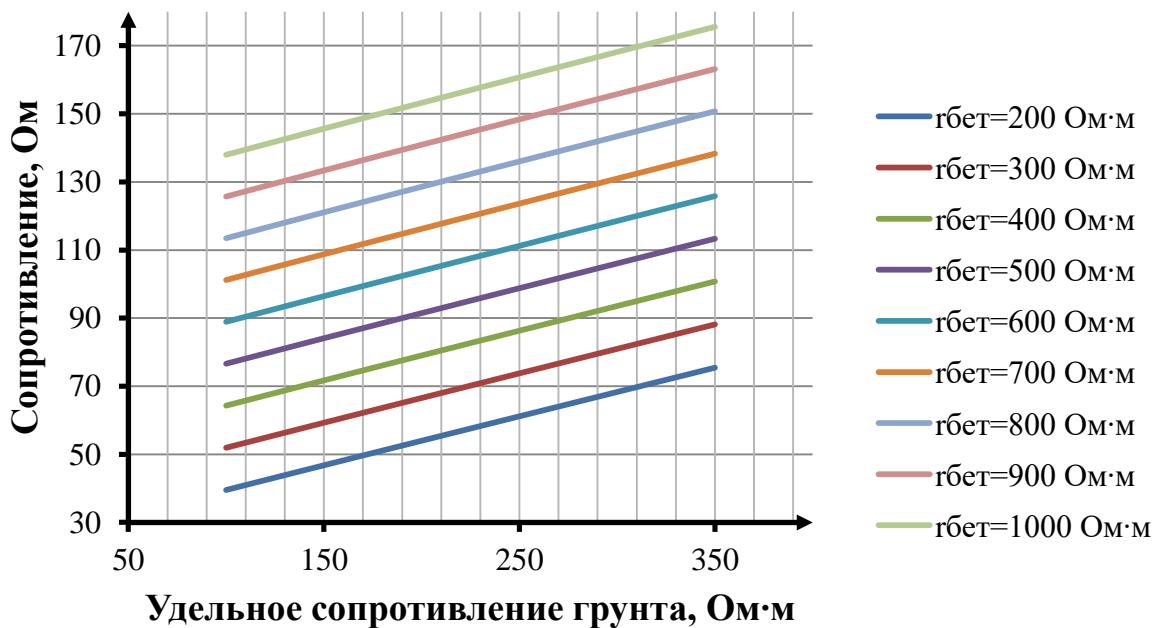


Рисунок 2.10 – Зависимость сопротивления фундамента ТСА-4 от удельных сопротивлений грунта и бетона

Из рисунков 2.8 и 2.9 можно увидеть, что сопротивление нераздельной опоры в среднем меньше, чем сопротивление раздельной. Это объясняется наличием

дополнительного переходного сопротивления между внешней поверхностью опоры и внутренней поверхностью стакана у раздельной опоры. Кроме этого видно, что сильнее на величину сопротивления обоих типов опор влияет величина удельного сопротивления бетона, нежели удельного сопротивления грунта.

На величину сопротивления железобетонных конструкций оказывает влияние наличие гидроизоляционного слоя. В качестве гидроизоляции, как правило, используется составы типа битума, обладающие большим удельным сопротивлением. У опор контактной сети битумный состав наносится на основание опоры: у нераздельных опор он полностью покрывает подземную часть, у раздельных – ту часть, которая помещается в стакан. При идеальном состоянии гидроизоляции: отсутствии трещин и повреждений, сопротивление опоры будет измеряться сотнями кОм, однако в реальности защитный слой может быть поврежден, иметь трещины или вообще отсутствовать. Исходя из вышесказанного, необходимо определить зависимость сопротивления железобетонных конструкций от наличия повреждений гидроизоляционного слоя.

Наличие гидроизоляции может быть учтено в описанных выше моделях путем задания слоя с заданными параметрами на конкретных поверхностях. К параметрам слоя относится удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и толщина. В случае железобетонных опор толщина слоя может быть принята равной 0,5 мм, удельное сопротивление битума равно  $10^{-13}$  Ом·м, диэлектрическая проницаемость битума равна 2,5. Слой с такими параметрами для не раздельной опоры задается на высоту 4 м от основания опоры, для раздельной опоры – на высоту 0,8 м от основания опоры.

Трещины в гидроизоляционном слое моделировались овалами различного сечения, располагавшимися ниже уровня земли. Моделирование проводилось для овалов сечением: 25, 100, 225, 1257, 3142 и 6283 мм<sup>2</sup>. В случае не раздельной опоры овал располагался на 0,9 м ниже уровня поверхности земли, в случае раздельной опоры – на 0,175 м ниже уровня поверхности земли. Очевидно, что расположение трещины в защитном слое оказывает влияние на величину сопротивления,

но в данном случае цель – оценить влияние именно площади повреждения на сопротивление опоры.

В результате численного моделирования были получены аналогичные рисункам 2.5-2.7 распределения потенциала в земле и железобетонных конструкциях, на основе которых по формуле (2.3) были определены сопротивления конструкций при различных величинах удельных сопротивлений грунта и бетона.

Из рисунков 2.11, 2.12 видно, что сопротивление обеих конструкций нелинейно зависит от площади трещины, причем наличие даже небольшого повреждения гидроизоляционного слоя приводит к значительному снижению сопротивления всей конструкции. При увеличении площади трещины выше  $3000 \text{ мм}^2$  сопротивление снижается слабо, а в пределе по величине площади трещины оно стремится к величине для случая, когда гидроизоляция отсутствует.

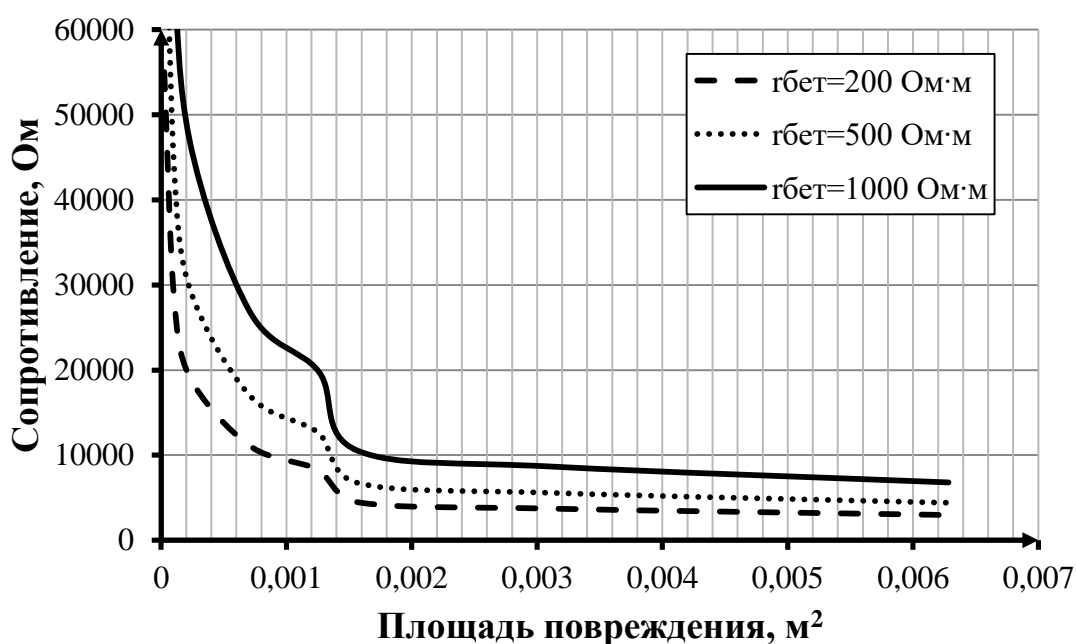


Рисунок 2.11 – Зависимость сопротивления нераздельной опоры СС-136.6 от площади моделируемой трещины при удельном сопротивлении грунта  $350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

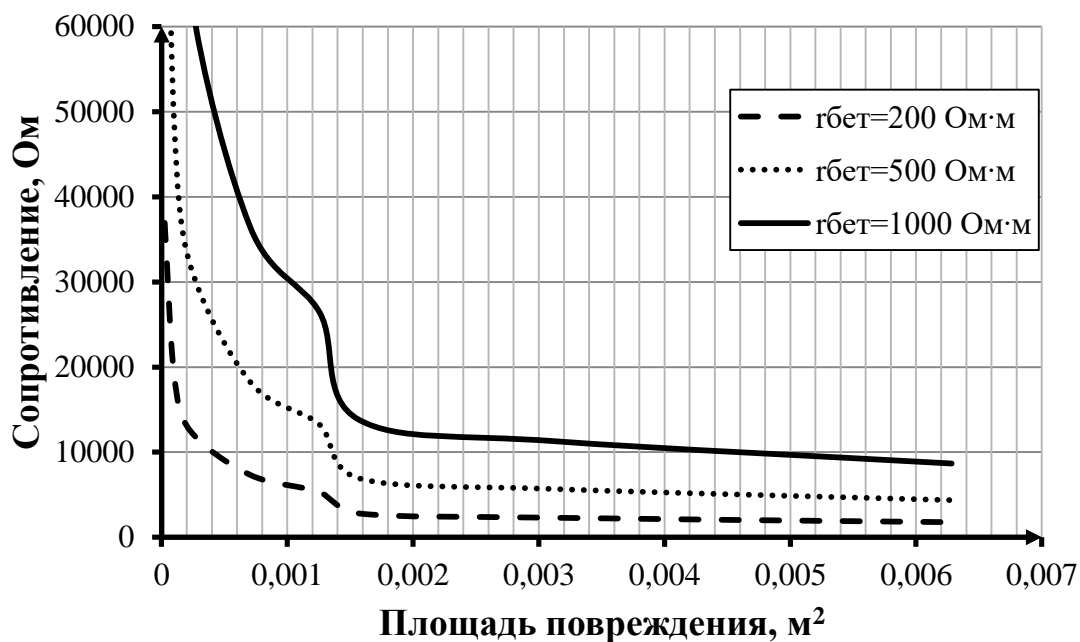


Рисунок 2.12 – Зависимость сопротивления отдельной опоры СС-106.6 от площади моделируемой трещины при удельном сопротивлении грунта 350 Ом·м

## 2.2 Оценка величин переходных сопротивлений и взаимных проводимостей в системе «рельсы-протяженный заземлитель»

Переходное сопротивление является одним из первичных параметров релейной сети, исходя из чего определение его величины является одной из задач, без решения которой невозможно оценить распределение потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» [2, 5, 14].

Очевидно, что определение величины переходного сопротивления – задача сложная, поскольку на него оказывает влияние множество факторов. Наиболее общими можно считать структуру и удельное сопротивление грунта, поскольку рельсы лежат на поверхности земли. Кроме этого, необходимо учитывать тип рельсов, геометрию верхнего строения пути, материал балластной призмы, материал шпал, наличие изолирующих прокладок между рельсами и шпалой.

Существуют аналитические выражения (1.3)-(1.5), позволяющие рассчитывать переходные сопротивления рельсовой сети, в которых частично или полностью учитывается геометрия верхнего строения пути с помощью различных коэффициентов.

Переходное сопротивление протяженного заземлителя относительно удаленной земли может быть определено с помощью выражения

$$r_{33} = \frac{1}{2\pi l \gamma_a} \lg \frac{8l^2}{\pi d t}, \quad (2.4)$$

где  $l$  – длина заземлителя, м;

$\gamma_a$  – проводимость земли, См/м;

$d$  – радиус заземлителя, м;

$t$  – глубина залегания заземлителя, м.

Недостаток формулы (2.4) заключается в том, что она не учитывает неоднородность грунта, которая выражается в различной величине его проводимости на различной глубине.

Понятие «взаимная проводимость» представляет собой величину, позволяющую учитывать взаимное влияние рельсовой сети и протяженного заземлителя, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Влияние выражается в протекании токов из рельсовой сети в заземлитель и наоборот. В этом случае важно учитывать пространственное расположение рельсовой сети и заземлителя относительно друг друга. Исходя из вышесказанного, взаимная проводимость системы «рельсы-протяженный заземлитель» должна учитывать границы раздела «заземлитель-грунт» и «рельсы-шпала», а также проводимость грунта их разделяющего.

В общем случае взаимная проводимость по сути своей является обратным значением переходного сопротивления, с той лишь разницей, что в случае взаимных проводимостей необходимо рассматривать проводимости двух элементов от-

носительно друг друга, а не проводимости одного элемента относительно удаленной земли.

Расчеты переходных сопротивлений и взаимных проводимостей основаны на системе уравнений Максвелла, описывающих любые электромагнитные поля в любых средах. Сложность расчета заключалась в правильном задании граничных условий и получении конкретного решения. Для этой цели применялись допущения, которые упрощали математическую модель, позволяя получить аналитические решения. Однако подобный подход не всегда давал точные результаты и мог приводить к значительным погрешностям.

Развитие цифровых технологий открыло возможности для применения численных методов расчета, основная идея которых заключается в переходе от выполнения граничных условий на всей расчетной области к выполнению граничных условий на наборе заданных точек. Численные методы позволили с достаточной степенью точности решить некоторые задачи, которые нельзя было решить аналитически. При численном решении можно учитывать конкретную геометрию рассматриваемого объекта, при этом иногда не требуется вводить допущений для ее упрощения. Однако, для численных решений необходимы значительные вычислительные мощности, специализированные программные продукты, а также навык работы с ними.

При определении переходного сопротивления рельсовой сети можно использовать численный метод расчета, а именно метод конечных элементов. В этом случае следует рассматривать поперечное сечение пути, внутри которого и будет определяться распределение электрического поля. На основе этого распределения можно определить переходное сопротивление рельсовой сети на соответствующих границах [116].

Распределение электрического поля в проводящем пространстве описывается системой уравнений (2.1), которая применима и для случая двухмерной задачи.

Дальнейшие численные расчеты по методу конечных элементов выполняются с помощью программного комплекса *Comsol Multiphysics*.



Решение будет выполняться для поперечного сечения пути, оборудованного протяженным заземлителем. Геометрия расчетной модели представлена на рисунке 2.13.

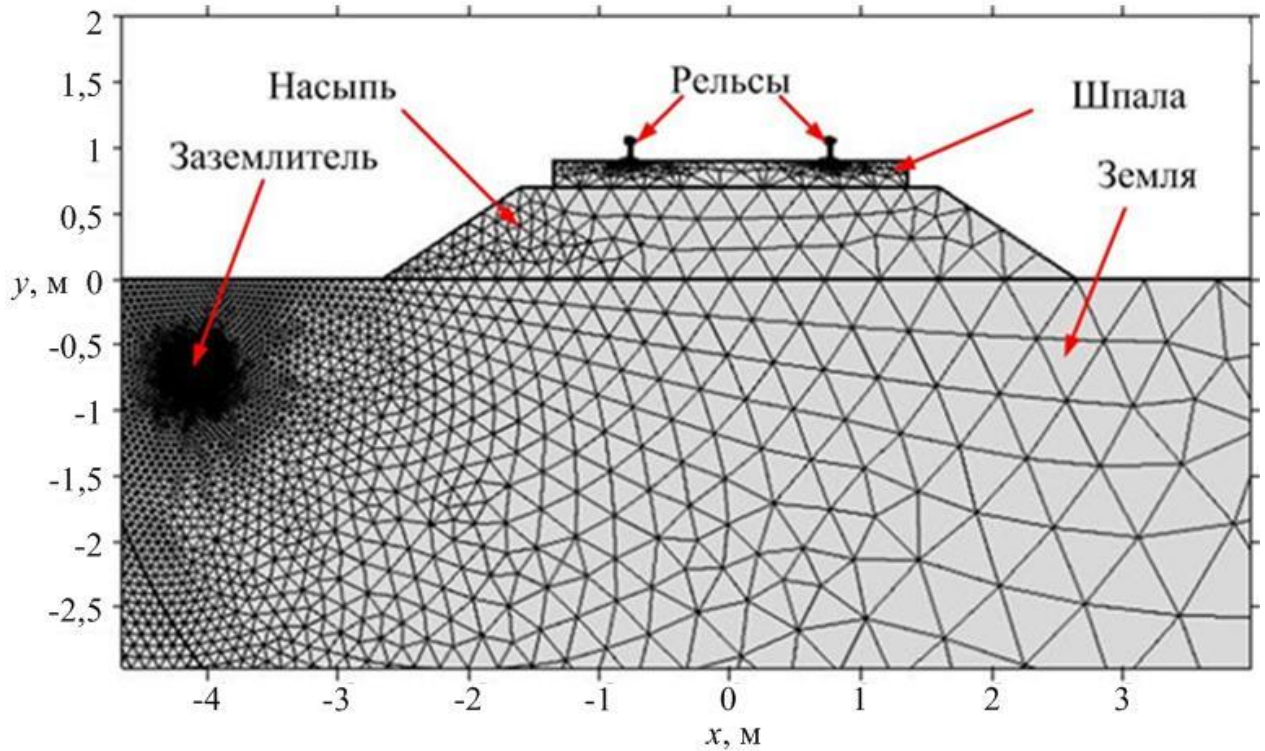


Рисунок 2.13 – Геометрия расчетной модели поперечного сечения пути

Геометрия включает в себя шпалу, балласт и грунт. При этом удельные сопротивления указанных элементов много больше удельного сопротивления стали рельсов и заземлителя, что позволяет не учитывать распределение электрического поля внутри них.

При рассмотрении поперечного сечения пути используется двумерная модель, соответственно на рисунке 2.13 указаны размерности по вертикальной и горизонтальной оси. Расчетная область сделана в разы больше габаритов пути для повышения точности расчета.

Для решения системы уравнений (2.1) на расчетной области по рисунку 2.13 необходимо задать граничные условия, которые определяли бы область нулевого потенциала и область потенциала заданного.

При определении переходного сопротивления рельсовой сети нулевой потенциал будет задаваться на внешней границе расчетной области, представляющей собой удаленную землю. Соответственно, потенциал, отличный от нуля, будет задаваться на линиях соприкосновения рельсов со шпалой.

При определении взаимной проводимости двух элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» на одно- или двухпутном участке граничные условия задаются исходя из того, что нужно определить проводимость только между двумя конкретными элементами. В этом случае нулевой потенциал задается на границе первого элемента, а потенциал, отличный от нуля, задается на втором элементе. Очевидно, что если поменять элементы местами искомая величина не изменится. При этом на внешней границе расчетной области задается условие изоляции.

Помимо граничных условий, обеспечивающих решаемость рассматриваемой модели, важную роль играют материалы объектов, участвующих в модели. В нашем случае это материалы шпал, балласта и грунта. Для определения распределения электрического поля необходимо задать удельные сопротивления указанных объектов. В качестве материала шпал будет рассматриваться бетон, а в качестве материала балласта – щебень. В отношении грунта проще задавать его конкретное удельное сопротивление, поскольку оно сильно варьируется в зависимости от состава и состояния грунта.

Это же касается и щебня: сухой щебеночный балласт крайне слабо проводит электрический ток, имея удельное сопротивление порядка 5000 Ом/м. Со временем балласт загрязняется и увлажняется, что приводит к снижению его удельного сопротивления до величин порядка 3000 Ом/м.

Необходимо определить значения переходных сопротивлений и взаимных проводимостей при различных величинах удельных сопротивлений грунта, бетона шпал, щебня балласта. Удельное сопротивление бетона шпал принимается равным 200, 500 и 1000 Ом·м; удельное сопротивление щебня принимается равным 3000 и 5000 Ом·м, сопротивление грунта принимается равным 150, 250 и 350 Ом·м.

Кроме параметров материалов элементов, искомые величины будут зависеть от расположения элементов. Так взаимные проводимости будут зависеть от глубины залегания заземлителя, соответственно этот параметр также будет иметь несколько значений.

Далее необходимо пояснить, каким образом будут определяться искомые сопротивления и проводимости. В результате численного моделирования будет получено распределение потенциалов внутри рассматриваемой области, на основе которого можно будет определить величину напряженности электрического поля и плотности тока. Очевидно, что искомые величины будут зависеть от плотности тока, направленной по нормали к рассматриваемой границе. В случае с заземлителем: по нормали к границе заземлителя, в случае с рельсами – по нормали к границе соприкосновения рельсов и шпалы. Переходное сопротивление будет определяться выражением

$$r = \frac{\varphi}{\int_L J_n}, \quad (2.5)$$

где  $L$  – граница, на которой определяется переходное сопротивление;

$\varphi$  – величина потенциала на границе, В;

$J_n$  – составляющая вектора плотности тока, направленная по нормали к рассматриваемой границе, А/м.

По аналогичному принципу проводится моделирование поперечного сечения двухпутного участка постоянного тока. Основное отличие будет заключаться в геометрии расчетной модели (рисунок 2.14), которая будет включать большее количество элементов.

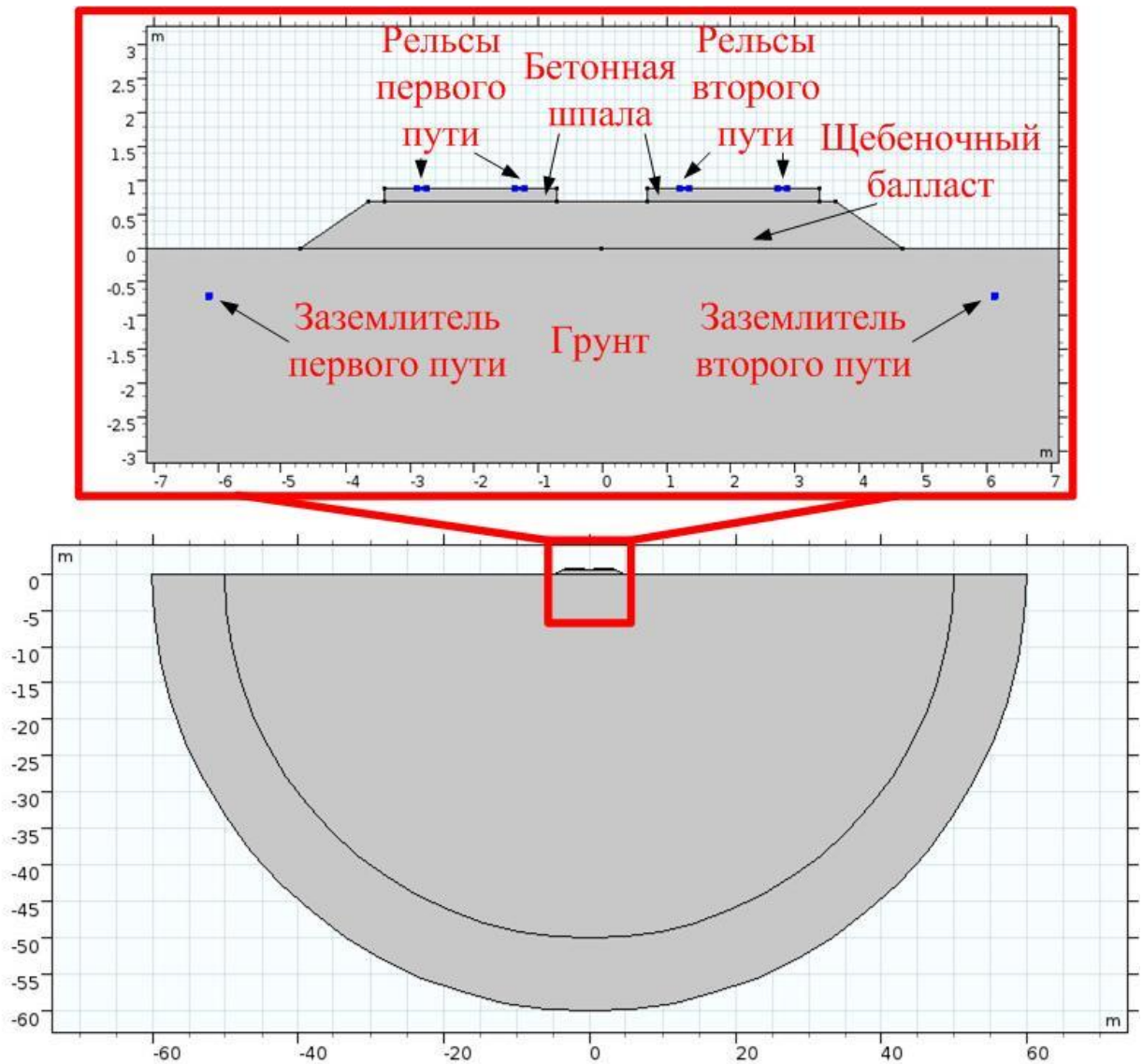


Рисунок 2.14 – Геометрия расчетной модели двухпутного участка

Задание граничных условий для определения конкретного переходного сопротивления или взаимной проводимости будет осуществляться по тому же принципу, что и для случая однопутного участка.

Распределения электрического поля в рассматриваемой области для одно- и двухпутного участков приведены на рисунках 2.15 и 2.16 соответственно

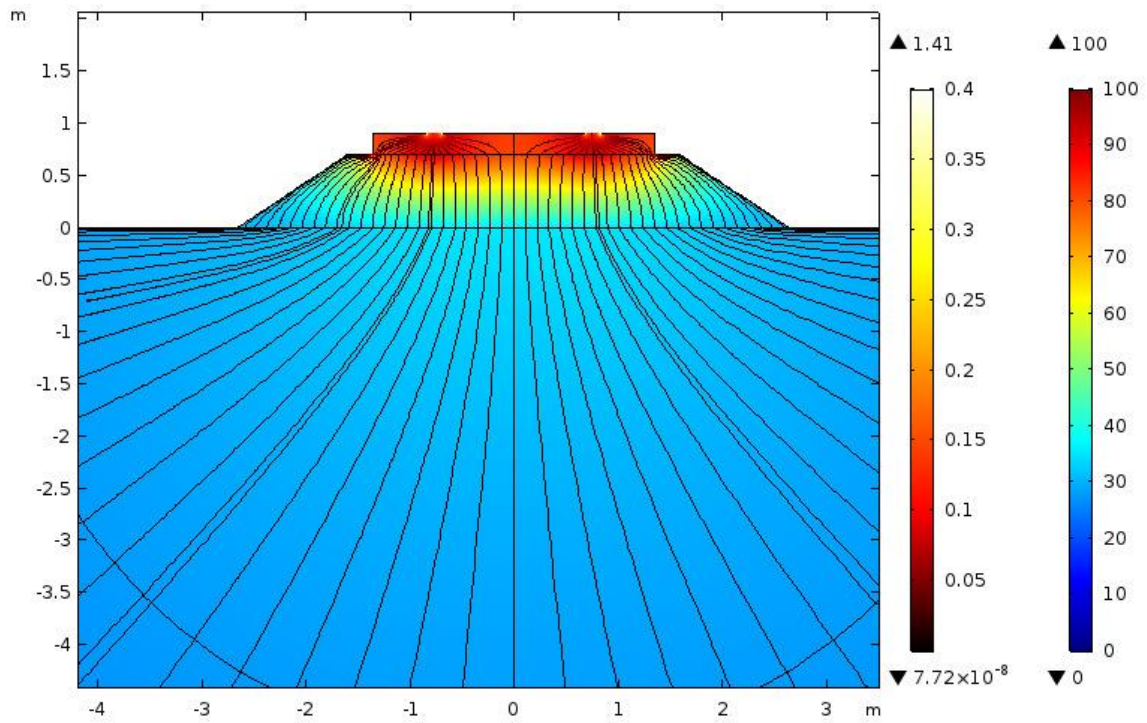


Рисунок 2.15 – Распределение электрического потенциала в поперечном сечении однопутного участка, первая цветовая шкала в  $A/m^2$ , вторая цветовая шкала в ВОЛЬТАХ

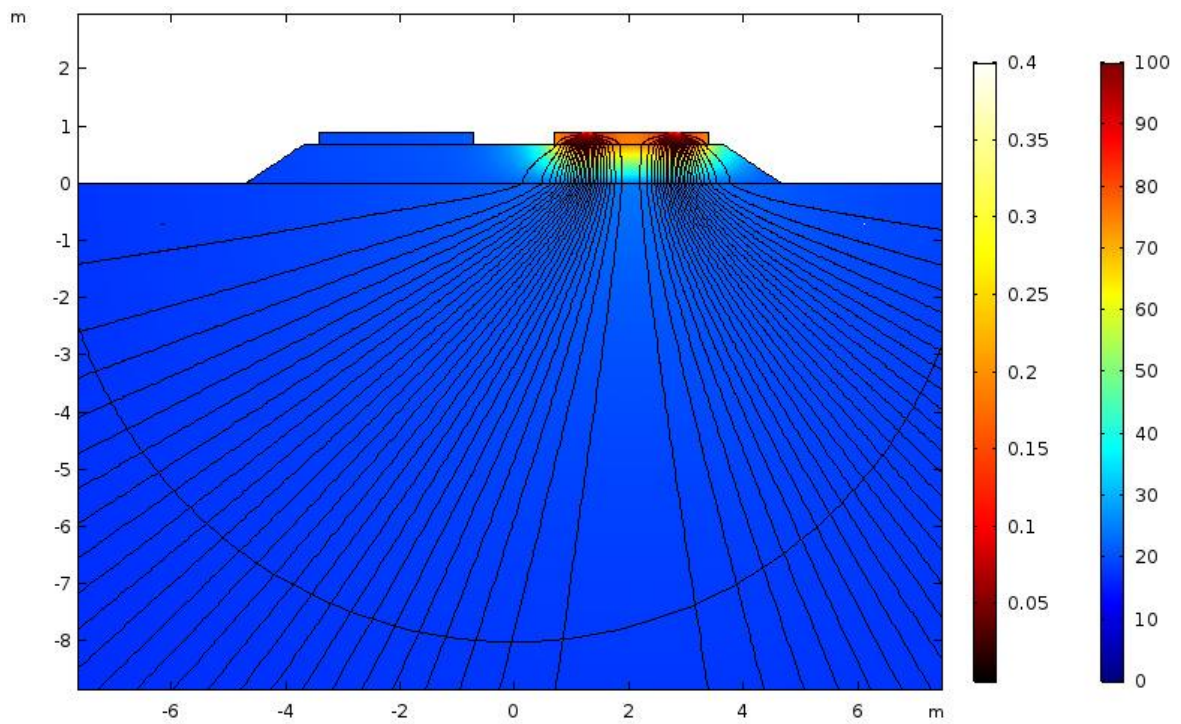


Рисунок 2.16 – Распределение электрического потенциала в поперечном сечении двухпутного участка, первая цветовая шкала в  $A/m^2$ , вторая цветовая шкала в ВОЛЬТАХ



На рисунках 2.15, 2.16 в виде цветового распределения показано распределение потенциала вблизи верхнего строения пути. В обоих случаях граничные условия задавались на границе между рельсами и шпалой и на внешней границе расчетной области (на рисунках 2.15, 2.16 не показана). Из рисунков видно, что вблизи линии задания потенциала наблюдается наибольшее его значение, которое снижается по мере удаления. Также на рисунках показаны линии плотности тока, имеющие цветовую градацию. Очевидно, что наибольшая плотность тока наблюдается вблизи границы, на которой задан потенциал. Это говорит об адекватности полученных результатов численного решения модели поперечного сечения пути.

Конечной целью численного моделирования является получение зависимости переходных сопротивлений и взаимных проводимостей всех элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» при различных значениях удельного сопротивления грунта, балласта, шпал и глубины залегания заземлителя. Результаты расчета взаимной проводимости рельсов первого пути и заземлителя первого пути представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Взаимная проводимость «рельсы первого пути-заземлитель первого пути», См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,002046	0,001745	0,001522
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001426	0,001272	0,001149
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001816	0,001575	0,001391
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001307	0,001177	0,001070
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001547	0,001368	0,001227
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001155	0,001052	0,000966

Остальные результаты расчета сопротивлений и проводимостей сведены в таблицы и представлены в приложении А.

### 2.3 Математическая модель системы «рельсы-земля»

Рельсовая сеть, как длинная линия, характеризуется двумя первичными параметрами: продольным сопротивлением рельсов  $r_p$  и переходным сопротивлением «рельсы-земля»  $r_{pз}$ . При этом сопротивление растеканию рельсов в близлежащих слоях земли включается в переходное сопротивление рельсов, что позволяет принять сопротивление земли равным 0. Собственно первичные параметры используются при записи системы дифференциальных уравнений (1.1), которая представляет собой математическую модель системы «рельсы-земля». Общее решение этой системы относительно потенциала рельсовой сети  $\varphi_p$  в зависимости длины линии  $x$  имеет вид

$$\varphi_p = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}, \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения рельсовой сети;

$A_1, A_2$  – постоянные интегрирования.

Основываясь на теории длинных линий, коэффициент распространения рельсовой сети может быть выражен формулой

$$\gamma = \sqrt{\frac{r_p}{r_{pз}}}, \quad (2.7)$$

Переходное сопротивление «рельсы-земля»  $r_{pз}$  может быть определено с помощью формул (1.3)–(1.5), а также с помощью численного моделирования, рассмотренного в разделе 2.2.

Собственно основная проблема оценки значения  $\varphi_r$  заключается в определении постоянных интегрирования функции потенциала, исходя из набора граничных условий.

В [19] рассматривается методика, основанная на методе наложения. В этом случае эквивалентная функция потенциала рассматривается в каждой точке как сумма потенциалов, создаваемых каждым из токов на рассматриваемом участке. В качестве таких токов рассматриваются токи электровозов и токи тяговых подстанций. При этом принимается допущение о том, что рельсовая сеть неизменна по всему рассматриваемому участку. В реальности на различных участках железных дорог постоянного тока могут быть различные удельные сопротивления слоев земли, различные типы рельсов и рельсовых скреплений. Исходя из этого, на различных участках первичные параметры рельсовой сети будут отличаться и метод наложения будет уже неприменим.

Возможен иной подход к определению постоянных интегрирования, позволяющий учитывать различия участков рельсовой сети. Функцию потенциала можно рассматривать как кусочно-заданную функцию, непрерывную на всей длине участка [117]. В этом случае на каждом из отрезков функция потенциала будет определяться своими постоянными интегрирования, которые могут быть различны. Тогда каждый из отрезков можно рассматривать как рельсовую сеть со своими первичными параметрами.

В дальнейшем рассмотрим простейший случай на рисунке 2.17: однопутный участок с двумя тяговыми подстанциями, реализующими двустороннее питание межподстанционной зоны. Тяговая нагрузка будет представлена одиночным электровозом.

С точки зрения реальных участков железной дороги рельсовая сеть имеет очень большую протяженность, которая может быть принята равной бесконечности. В общем случае длина рельсовой сети может быть ограничена конкретным значением  $l$ . Расположение электровоза на участке будет задано параметром  $a$ . Для упрощения расчетов токов подстанций примем допущение, что подвеска и параметры рельсовой сети одинаковы на всем рассматриваемом участке.



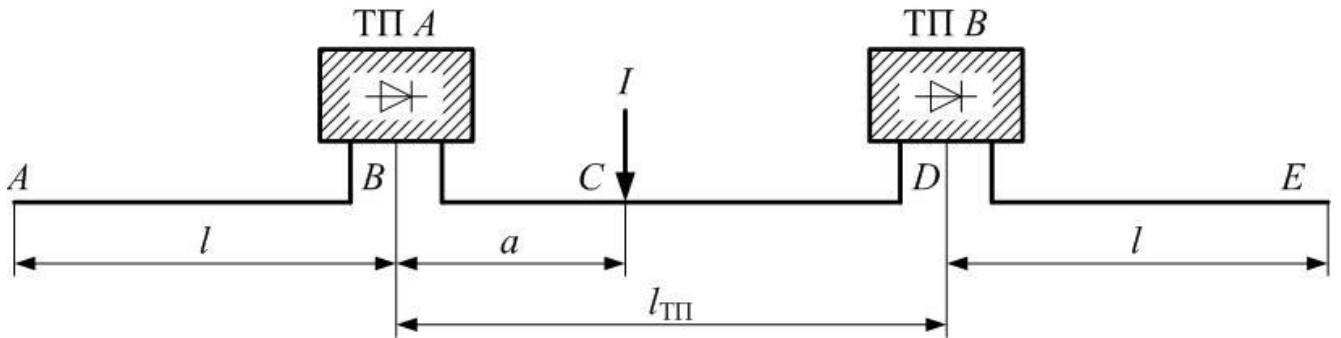


Рисунок 2.17 – Расчетная схема однопутного участка железной дороги постоянного тока

Разбиение участка на отрезки следует производить по местам расположения подстанций и электровозов. Это объясняется тем, что функция тока в этих точках должна иметь разрыв, поскольку токи будут стекаться и растекаться слева и справа от этих точек. Таким образом, для случая на рисунке 2.17 необходимо разбить участок на 4 отрезка:  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ . На каждом из этих участков функция потенциала рельсов будет задана отдельно, но постоянные интегрирования каждой из функций будут определяться совместно в рамках одной системы уравнений.

Каждый из рассматриваемых отрезков имеет свою систему отсчета. В данном случае удобно принять за нулевые точки расположения тяговых подстанций  $A$  и  $B$ , т.е. для отрезка  $AB$  положительным направлением отсчета будет направление справа налево от подстанции  $A$ , а для отрезка  $BC$  положительным будет направление слева направо от подстанции  $A$ . По тому же принципу выбираются положительные направления для подстанции  $B$ .

Функция потенциала рельсовой сети имеет две постоянных интегрирования (2.6), соответственно при разбиении участка на отрезки постоянных интегрирования будет в два раза больше, чем количество участков. В нашем случае их будет восемь. Соответственно для их определения необходимо задать восемь граничных условий, объединенных в одну систему алгебраических уравнений.

В общем случае для системы «рельсы-земля» можно выделить два типа граничных условий:

- 1) величина тока в узловых точках;

2) неразрывность функции потенциала в узловых точках.

С точки зрения математики первое – это значение производной функции в заданной точке, второе – значение функции в точке. Это хорошо видно из системы (1.1).

Для удобства дальнейших рассуждений примем следующие условные обозначения:  $\varphi_{PAB}$ ,  $\varphi_{PBC}$ ,  $\varphi_{PCD}$ ,  $\varphi_{PDE}$  – функция потенциала рельсов на отрезках  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DE$  соответственно,  $I_{PAB}$ ,  $I_{PBC}$ ,  $I_{PCD}$ ,  $I_{PDE}$  – функция тока рельсов на отрезках  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DE$  соответственно,  $I$  – ток электровоза,  $I_{ТПА}$ ,  $I_{ТПВ}$  – токи тяговых подстанций  $A$  и  $B$  соответственно.

Исходя из указанных типов граничных условий, сформулируем конкретные граничные условия для случая по рисунку 2.17:

- 1) ток рельсов на концах рассматриваемого участка принимается равным 0, поскольку весь ток в этих точках стекает в землю;
- 2) сумма токов в узловых точках будет равна заданному в этой точке току;
- 3) в узловых точках значение функции потенциала рельсов справа и слева равны.

Второй пункт требует дополнительного пояснения. Указанное условие применяется к точкам расположения тяговых подстанций и электровозов. Сумма токов, протекающих справа и слева от подстанции или электровоза равна току подстанции или электровоза соответственно.

В итоге для случая по рисунку 2.17 граничные условия будут выражаться следующей системой алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{PAB}(0) &= \varphi_{PBC}(0) \\ \varphi_{PCD}(0) &= \varphi_{PDE}(0) \\ \varphi_{PBC}(a) &= \varphi_{PCD}(l_{ТП} - a) \\ I_{PAB}(l) &= 0, I_{PDE}(l) = 0 \\ I_{PAB}(0) + I_{PBC}(0) &= I_{ТПА} \\ I_{PCD}(0) + I_{PDE}(0) &= I_{ТПВ} \\ I_{PBC}(a) + I_{PCD}(l_{ТП} - a) &= I \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Если записать систему (2.8) с учетом системы (1.1) и выражения (2.6) итоговая система уравнений примет вид

$$\left. \begin{aligned}
 A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} &= A_3 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} \\
 A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} &= A_7 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} \\
 A_3 \cdot e^{\gamma \cdot a} + A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot a} &= A_5 \cdot e^{\gamma \cdot (l_{\text{ТП}} - a)} + A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot (l_{\text{ТП}} - a)} \\
 -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot l} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot l}) &= 0, \quad -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_7 \cdot e^{\gamma \cdot l} - A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot l}) = 0 \\
 -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_3 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) &= I_{\text{ТПА}} \\
 -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_7 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) &= I_{\text{ТПВ}} \\
 -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_3 \cdot e^{\gamma \cdot a} - A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot a}) - \frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_5 \cdot e^{\gamma \cdot (l_{\text{ТП}} - a)} - A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot (l_{\text{ТП}} - a)}) &= I
 \end{aligned} \right\}, \quad (2.9)$$

где  $A_1, A_2$  – постоянные интегрирования функции потенциала рельсов на участке  $AB$ ;

$A_3, A_4$  – постоянные интегрирования функции потенциала рельсов на участке  $BC$ ;

$A_5, A_6$  – постоянные интегрирования функции потенциала рельсов на участке  $CD$ ;

$A_7, A_8$  – постоянные интегрирования функции потенциала рельсов на участке  $DE$ .

После определения постоянных интегрирования и записи функции потенциала рельсов для каждого из отрезков можно выразить функции изменения тока  $I_{\text{P}}$  используя систему (1.1). В общем виде с учетом (2.6) она примет вид

$$I_{\text{P}} = -\frac{1}{r_{\text{P}}} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot x} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot x}). \quad (2.10)$$

При построении графиков необходимо учесть, что каждый из отрезков имеет свою систему координат, которые следует связать с общей точкой отсчета. Для простоты ее можно расположить в начале рассматриваемого участка.

## **2.4 Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель»**

В дальнейшем в работе рассматриваются технические средства [98, 103, 104], использующие специальный протяженный заземлитель.

Под системой «рельсы-протяженный заземлитель» следует понимать собственно рельсы и протяженный заземлитель расположенные на определенном расстоянии относительно друг друга, причем заземлитель располагается в земле на определенной глубине.

Исследование распределения электрических величин в системе «рельсы-протяженный заземлитель» может быть выполнена с помощью эксперимента, однако использование только этого метода исследования требует значительных материальных затрат. Более эффективным видится дополнение экспериментального метода теоретическим исследованием на основе математической модели, учитывающей различные параметры элементов системы.

Исходя из протяженности рельсовой сети и соответственно заземлителя, а также из-за их связи с землей в системе «рельсы-протяженный заземлитель», происходит изменение величины тока, протекающего по каждому из элементов системы и как следствие изменение величины потенциала каждого из элементов по длине. Изменение тока элемента зависит от величины переходного сопротивления. Исходя из этого, основными параметрами системы будут являться продольные и переходные сопротивления, которые в свою очередь зависят от удельных сопротивлений элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель».

В этом случае функция потенциала рельсовой сети и протяженного заземлителя также будет рассматриваться как непрерывная кусочно-заданная функция, что позволит использовать различные первичные параметры на различных участках.

Для определения потенциалов рельсовой сети на участках постоянного тока используется система уравнений (1.1)

Из системы видно, что протекание тока по рельсовой сети создает в них падение напряжения на каждом бесконечно малом участке, которое в свою очередь является причиной стекания тока в землю. Знак минус показывает, что ток рельсов уменьшается по длине.

По аналогичному принципу может быть записана система уравнений для протяженного заземлителя.

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx} \\ \frac{\varphi_3}{r_{33}} &= -\frac{dI_3}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где  $r_3$  – погонное сопротивление заземлителя, Ом/м;

$r_{33}$  – переходное сопротивление «заземлитель-земля», Ом·м;

$I_3$  – ток протяженного заземлителя, А;

$\varphi_3$  – потенциал протяженного заземлителя относительно удаленной земли, В.

Распределение потенциала протяженного заземлителя так же будет зависеть от величины стекающего с него тока.

Стоит отметить, что представленная система уравнений является обобщенной для различных вариантов исполнения протяженного заземлителя. Основными вариантами являются подземный заземлитель и заземляющий провод, при этом для каждого из вариантов система уравнений будет приобретать особенности, которые будут рассмотрены в отдельном разделе этой главы.

В системе «рельсы-протяженный заземлитель» элементы находятся на близком расстоянии друг от друга и оказывают взаимное влияние на распределение электрического поля. Исходя из этого, необходимо рассматривать систему уравнений, которая описывает распределение потенциалов и токов обоих элементов системы. Таковой является система вида

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx}, & I_p r_p &= -\frac{d\varphi_p}{dx} \\ -\frac{\varphi_3}{r_{33}} &= \frac{di_3}{dx}, & -\frac{\varphi_p}{r_{p3}} &= \frac{di_p}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Решение системы (2.12) может быть найдено относительно потенциала рельсовой сети и протяженного заземлителя или относительно их токов. При решении относительно потенциалов система (2.12) преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r_3} \cdot \frac{d^2\varphi_3}{dx^2} - \frac{\varphi_3}{r_{33}} &= 0 \\ \frac{1}{r_p} \cdot \frac{d^2\varphi_p}{dx^2} - \frac{\varphi_p}{r_{p3}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Система (2.13) представляет собой систему однородных дифференциальных уравнений второго порядка, общее решение которой имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p &= A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \\ \varphi_3 &= B_1 e^{\alpha x} + B_2 e^{-\alpha x} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где  $B_1, B_2$  – постоянные интегрирования функции потенциала протяженного заземлителя;

$\alpha = \sqrt{r_3 / r_{33}}$  – коэффициент распространения протяженного заземлителя.

Поскольку решение системы (2.14) в свою очередь также представляет собой систему уравнений, то постоянные интегрирования должны определяться совместно с помощью общих граничных условий.

При определении постоянных интегрирования возможны два подхода. Первый подход, заключается в использовании принципа наложения, по аналогии с методикой, описанной в [19], исходя из допущения о том, что первичные параметры рельсовой сети и протяженного заземлителя неизменны по всей длине рассматриваемого участка. Второй подход основан на методике, описанной в разделе 2.3.

При обоих подходах сложность определения постоянных интегрирования заключается в том, что конструкция протяженного заземляющего устройства предполагает его соединение с отрицательным полюсом тяговой подстанции. Это условие приводит к тому, что напрямую методика из [19] неприменима, поскольку в этом случае потенциалы от всех токов рассматриваются независимо.

Рассмотрим далее граничные условия в характерных точках, которыми являются места расположения тяговых подстанций и электровозов на межподстанционной зоне. В этих точках условия должны быть заданы как для рельсовой сети, так и для протяженного заземлителя, в противном случае система уравнений не будет иметь решения [116,117].

Присоединение рельсовой сети и протяженного заземлителя к «-» шине тяговой подстанции можно учесть, приняв допущение о том, что потенциал рельсов и заземлителя в месте расположения тяговой подстанции равны. Тогда граничные условия для тяговой подстанции примут вид

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p(x_{ТП}) &= \varphi_3(x_{ТП}) \\ I_p(x_{ТП}) + I_3(x_{ТП}) &= I_{ТП} \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

где  $x_{ТП}$  – координата расположения тяговой подстанции, км;

$I_{ТП}$  – ток тяговой подстанции, А.

В реальности рельсовая сеть присоединяется к «-» шине тяговой подстанции с помощью фидера обратного тока, который может быть выполнен из боль-

шого числа параллельно соединенных проводов. Число проводов, присоединяющих протяженный заземлитель к «-» шине будет заведомо меньше, поэтому их общее сопротивление будет больше. Наглядно это поясняет схема замещения на рисунке 2.18.

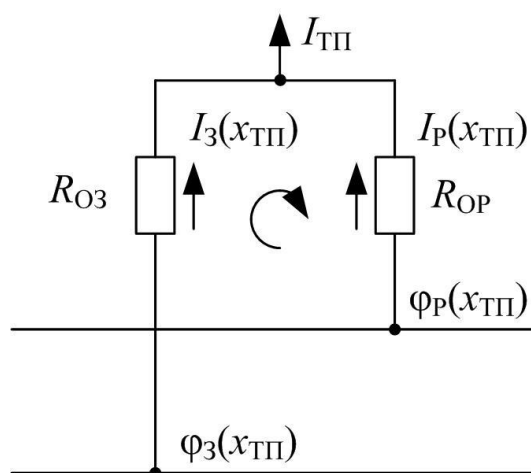


Рисунок 2.18 – Схема замещения подключения рельсовой сети и протяженного заземлителя к тяговой подстанции

На рисунке 2.18  $R_{ОР}$  и  $R_{ОЗ}$  – это сопротивление проводов, подключающих к тяговой подстанции рельсовую сеть и протяженный заземлитель соответственно.

Используя второй закон Кирхгофа для участка цепи применительно к рисунку 2.18, можно записать уточненные граничные условия, которые примут вид

$$\left. \begin{aligned} \Phi_P(x_{ТП}) &= R_{ОР} \cdot I_P(x_{ТП}) - R_{ОЗ} \cdot I_3(x_{ТП}) + \Phi_3(x_{ТП}) \\ I_P(x_{ТП}) + I_3(x_{ТП}) &= I_{ТП} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

В месте расположения электровоза граничные условия по току будут задаваться только для рельсовой сети, поскольку через «металлический» контакт колеса и рельса ток втекает только в рельсы, при этом сосредоточенного тока в заземлитель не втекает. Последнее не означает, что ток заземлителя в месте расположения электровоза будет равен 0. Использование такого условия привело бы к тому, что в этой точке функция потенциала заземлителя имела бы точку перегиба,



что неверно. Таким образом, в месте расположения нагрузки граничное условие по протяженному заземлителю не может быть связано с производной от функции его потенциала, а, следовательно, и его током в этой точке. Исходя из вышесказанного, условие нужно связать со значением потенциала заземлителя. В результате граничные условия в месте расположения электровоза примут вид

$$\left. \begin{aligned} I_p(x_{\text{Э}}) &= I \\ \varphi_3(x_{\text{Э}}) &= \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (2.17)$$

где  $\varphi$  – значение потенциала заземлителя в месте расположения электровоза, В.

Далее рассмотрим участок железной дороги постоянного тока по рисунку 2.6, оборудованный протяженным заземлителем по всей длине участка. По аналогии со случаем, описанным в разделе 2.3, здесь необходимо разделить участок железной дороги по характерным точкам (тяговые подстанции и электровоз) на 4 отрезка, на каждом из которых будет задана своя функция потенциала рельсовой сети и протяженного заземлителя. Как видно из (2.14) на каждом отрезке функция потенциала определяется двумя постоянными интегрирования, тогда в результате необходимо составить систему из 16 алгебраических уравнений. Для удобства примем следующие обозначения величин:  $\varphi_{\text{ЗAB}}, \varphi_{\text{ЗBC}}, \varphi_{\text{ЗCD}}, \varphi_{\text{ЗDE}}$  – функция потенциала заземлителя на отрезках  $AB, BC, CD$  и  $DE$  соответственно,  $I_{\text{ЗAB}}, I_{\text{ЗBC}}, I_{\text{ЗCD}}, I_{\text{ЗDE}}$  – функция тока заземлителя на отрезках  $AB, BC, CD$  и  $DE$  соответственно. Используя также обозначения рисунка 2.6, сформулируем граничные условия

$$\left.
\begin{aligned}
\varphi_{PAB}(0) &= \varphi_{PBC}(0), \\
\varphi_{PCD}(0) &= \varphi_{PDE}(0) \\
\varphi_{3AB}(0) &= \varphi_{3BC}(0), \\
\varphi_{3CD}(0) &= \varphi_{3DE}(0) \\
\varphi_{PBC}(a) &= \varphi_{PCD}(l_{\text{ТП}} - a), \\
\varphi_{3BC}(a) &= \varphi_{3CD}(l_{\text{ТП}} - a) \\
I_{PAB}(l) &= 0 \\
I_{PDE}(l) &= 0 \\
I_{3AB}(l) &= 0 \\
I_{3DE}(l) &= 0 \\
\varphi_{PAB}(0) &= R_{\text{OP}} \cdot (I_{PAB}(0) + I_{PBC}(0)) - \\
&\quad - R_{\text{O3}} \cdot (I_{3AB}(0) + I_{3BC}(0)) + \varphi_{3AB}(0) \\
I_{PAB}(0) + I_{PBC}(0) + I_{3AB}(0) + I_{3BC}(0) &= I_{\text{ТПА}} \\
\varphi_{PCD}(0) &= R_{\text{OP}} \cdot (I_{PCD}(0) + I_{PDE}(0)) - \\
&\quad - R_{\text{O3}} \cdot (I_{3CD}(0) + I_{3DE}(0)) + \varphi_{3CD}(0) \\
I_{PCD}(0) + I_{PDE}(0) + I_{3CD}(0) + I_{3DE}(0) &= I_{\text{ТПБ}} \\
I_{PBC}(a) + I_{PCD}(l_{\text{ТП}} - a) &= I \\
\varphi_{3BC}(a) &= \varphi
\end{aligned}
\right\} \quad (2.18)$$

С учетом (2.12) система (2.18) примет вид

$$\begin{aligned}
& A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} = A_3 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} \\
& A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} = A_7 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} \\
& B_1 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_2 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} = B_3 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_4 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} \\
& B_5 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_6 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} = B_7 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_8 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} \\
& A_3 \cdot e^{\gamma \cdot a} + A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot a} = A_5 \cdot e^{\gamma \cdot (l_{\text{III}} - a)} + A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot (l_{\text{III}} - a)} \\
& B_3 \cdot e^{\alpha \cdot a} + B_4 \cdot e^{-\alpha \cdot a} = B_5 \cdot e^{\alpha \cdot (l_{\text{III}} - a)} + B_6 \cdot e^{-\alpha \cdot (l_{\text{III}} - a)} \\
& -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot l} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot l}) = 0, -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_7 \cdot e^{\gamma \cdot l} - A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot l}) = 0 \\
& -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_1 \cdot e^{\alpha \cdot l} - B_2 \cdot e^{-\alpha \cdot l}) = 0, -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_7 \cdot e^{\alpha \cdot l} - B_8 \cdot e^{-\alpha \cdot l}) = 0 \\
& A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} = R_{\text{OP}} \cdot \left( -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_3 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - R_{\text{O3}} \cdot \left( -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_1 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_2 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) - \right. \right. \\
& \left. \left. -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_3 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_4 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) \right) + B_1 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_2 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_1 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_2 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_3 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_1 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_2 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) - \frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_3 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_4 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) = I_{\text{III A}} \right. \\
& A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} + A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0} = R_{\text{OP}} \cdot \left( -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_7 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - R_{\text{O3}} \cdot \left( -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_5 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_6 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) - \right. \right. \\
& \left. \left. -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_7 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_8 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) \right) + B_5 \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B_6 \cdot e^{-\alpha \cdot 0} \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_5 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_7 \cdot e^{\gamma \cdot 0} - A_8 \cdot e^{-\gamma \cdot 0}) - \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_5 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_6 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) - \frac{1}{r_3} \cdot \alpha \cdot (B_7 \cdot e^{\alpha \cdot 0} - B_8 \cdot e^{-\alpha \cdot 0}) = I_{\text{III B}} \right. \\
& \left. -\frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_3 \cdot e^{\gamma \cdot a} - A_4 \cdot e^{-\gamma \cdot a}) - \frac{1}{r_p} \cdot \gamma \cdot (A_5 \cdot e^{\gamma \cdot (l_{\text{III}} - a)} - A_6 \cdot e^{-\gamma \cdot (l_{\text{III}} - a)}) = I \right. \\
& \left. B_3 \cdot e^{\alpha \cdot a} + B_4 \cdot e^{-\alpha \cdot a} = \varphi \right.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

где  $B_1, B_2$  – постоянные интегрирования функции потенциала заземлителя на участке  $AB$ ;

$B_3, B_4$  – постоянные интегрирования функции потенциала заземлителя на участке  $BC$ ;

$B_5, B_6$  – постоянные интегрирования функции потенциала заземлителя на участке  $CD$ ;

$B_7, B_8$  – постоянные интегрирования функции потенциала заземлителя на участке  $DE$ .

Система (2.19) выглядит достаточно громоздкой, но позволяет в полной мере учесть граничные условия для рассматриваемого случая. Следует отметить, что схема по рисунку 2.6 является одной из простейших.

## **2.5 Развитие математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель»**

Недостатком рассмотренной выше математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» является то, что в этой модели элементы системы рассматриваются только относительно удаленной земли. Конкретно это выражается в том, что токи, стекающие с рельсов и заземлителя, протекают только в направлении удаленной земли.

Протекание тока между элементами системы определяется соотношением их потенциалов, а также сопротивлением грунта, который их разделяет. Соответственно, чем больше разница потенциалов, тем большая величина тока будет протекать от рельсов к протяженному заземлителю. При этом величина стекающего тока с каждого из элементов зависит от его потенциала. Таким образом, потенциал каждого элемента системы будет зависеть от потенциала смежного элемента.

Схема замещения в этом случае примет вид

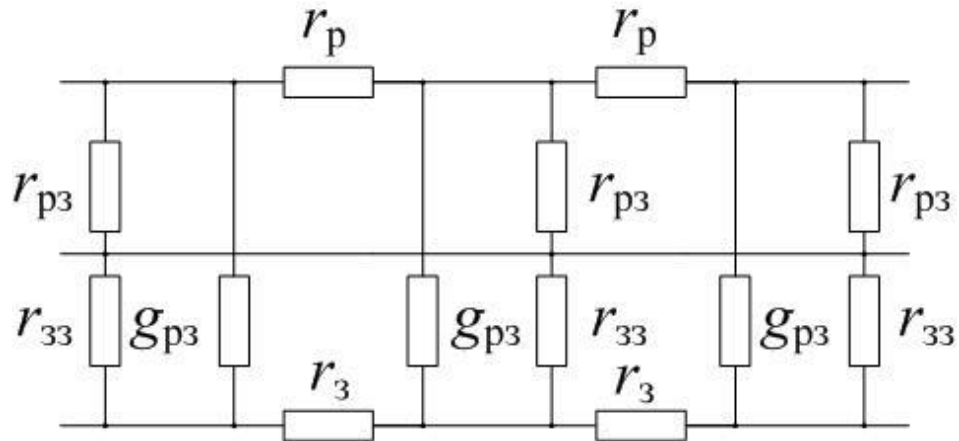


Рисунок 2.19 – Схема замещения системы «рельсы-протяженный заземлитель» при использовании заземляющего провода

Учитывая вышесказанное, можно записать уточненную систему дифференциальных уравнений, учитывающую взаимное влияние рельсовой сети и протяженного заземлителя друг на друга

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx} \\ I_p r_p &= -\frac{d\varphi_p}{dx} \\ -\left( \frac{\varphi_3}{r_{33}} + (\varphi_3 - \varphi_p) \cdot g_{p3} \right) &= \frac{dI_3}{dx} \\ -\left( \frac{\varphi_p}{r_{p3}} + (\varphi_p - \varphi_3) \cdot g_{p3} \right) &= \frac{dI_p}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где  $g_{p3}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью и протяженным заземлителем, См/м.

Общее решение системы уравнений (2.20) имеет вид

$$\varphi_P = -\frac{1}{2 \cdot r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33}} \cdot \left[ \begin{array}{l} \left( C_4 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma'' \cdot x} + C_3 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma'' \cdot x} \right) \cdot \begin{pmatrix} -r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \\ + r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \end{pmatrix} \\ + \left( C_2 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_1 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} \right) \cdot \begin{pmatrix} -r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \\ + r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}} - \alpha' \end{pmatrix} \end{array} \right]; \quad (2.21)$$

$$\varphi_3 = C_1 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_2 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_3 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma'' \cdot x} + C_4 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma'' \cdot x}$$

$$\gamma' = \frac{\sqrt{-r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3} \cdot \left( -r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P - r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} - r_3 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \right)}}{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3}}; \quad (2.22)$$

$$\gamma'' = \frac{\sqrt{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3} \cdot \left( r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P + r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} + r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_3 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \right)}}{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3}}; \quad (2.23)$$

$$\alpha' = \sqrt{\begin{array}{l} r_{33}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \cdot r_P^2 + 2 \cdot r_{33}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P^2 \cdot r_{P3} - 2 \cdot r_{P3}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \cdot r_3 \cdot r_{P3} - \\ - 2 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \cdot r_P \cdot r_3 \cdot r_{P3} + r_{33}^2 \cdot r_P^2 \cdot r_{P3}^2 + 2 \cdot r_{33}^2 \cdot r_P \cdot r_{P3}^2 \cdot r_3 - \\ - 2 \cdot r_{P3} \cdot r_P \cdot r_{P3}^2 \cdot r_3 \cdot \frac{1}{g_{P3}} + r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot r_{33}^2 + 2 \cdot r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \\ + r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \end{array}}, \quad (2.24)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – постоянные интегрирования.

Видно, что по сравнению с (2.14) общее решение значительно усложнилось в силу наличия четырех постоянных интегрирования в каждой из искомым функций. Формулы (2.21) – (2.24) уже малопригодны для аналитических расчетов, поэтому решение системы (2.20) целесообразно выполнять численными методами, в частности методом конечных элементов.

Рассмотренные выше математические модели применимы только для однопутных участков железных дорог постоянного тока. Интересной видится модель двухпутного участка, поскольку они также встречаются на дорогах нашей страны.

Особенностью использования протяженного заземляющего устройства на двухпутном участке заключается в наличии у каждого из путей своего заземлителя. Очевидно, что в этом случае рельсовая сеть и заземлители каждого из путей будут влиять друг на друга.

При использовании системы (2.12) пути двухпутного участка рассматривались бы как отдельные участки железной дороги. Влияние путей друг на друга выражалось бы в перераспределении токов по фидерам, подключающим рельсовую сеть и заземлители каждого из путей к тяговой подстанции. Такая модель системы была бы не точна, поскольку в ней не учитывается возможность перераспределения токов между элементами не только одного пути, но и смежных путей.

Для того чтобы в математической модели учесть взаимное влияние элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» необходимо ввести в систему величины взаимных проводимостей каждого из элементов относительно друг друга. Наличие смежного пути значительно увеличит количество связей в сравнении с однопутным участком. Наглядно это поясняет рисунок 2.20

На рисунке 2.20 стрелками показаны взаимные проводимости в поперечном сечении между элементами системы «рельсы – протяженный заземлитель» на примере заземлителя первого пути. Соответственно заземлитель первого пути связан, через соответствующие взаимные проводимости, с рельсами первого пути, рельсами второго пути и заземлителем второго пути. По аналогичному принципу можно выявить связь между всеми элементами системы. Наличие множества свя-

зей значительно усложняет систему «рельсы-протяженный заземлитель» двухпутного участка по сравнению с однопутным участком. Методика определения взаимных проводимостей рассмотрена в разделе 2.2.

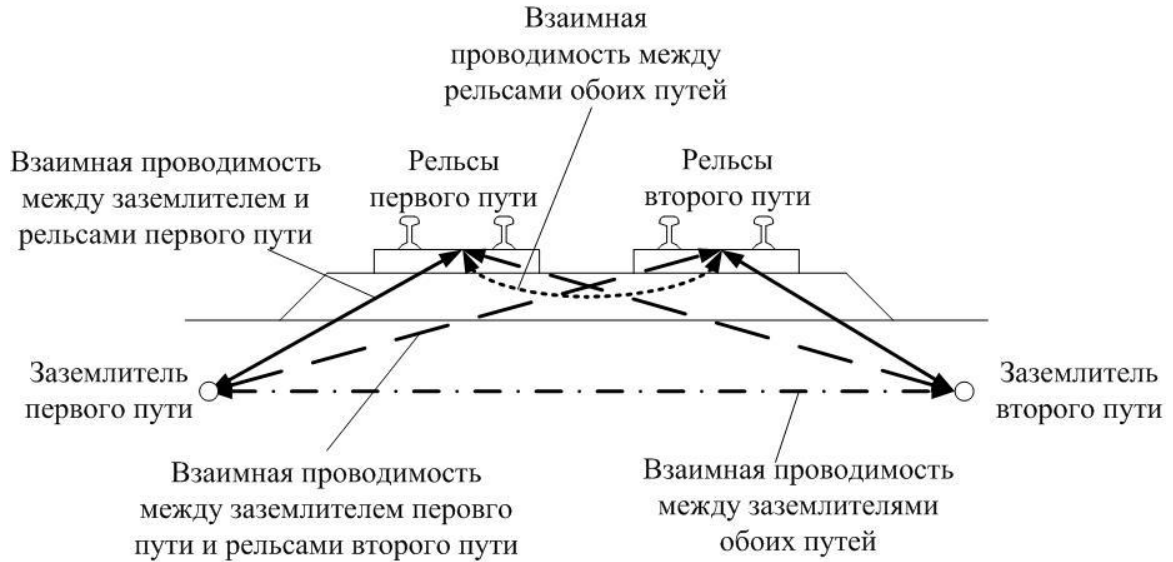


Рисунок 2.20 – Схема влияния элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» двухпутного участка друг на друга

Учитывая все выше сказанное, можно сформулировать систему дифференциальных уравнений, представляющую собой математическую модель описанной системы

$$\left. \begin{aligned} -I_{31}r_{31} &= \frac{d\varphi_{31}}{dx}, & -I_{P1}r_{P1} &= \frac{d\varphi_{P1}}{dx}, & -I_{32}r_{32} &= \frac{d\varphi_{32}}{dx}, & -I_{P2}r_{P2} &= \frac{d\varphi_{P2}}{dx} \\ \frac{\varphi_{31}}{r_{331}} + (\varphi_{31} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P131} + (\varphi_{31} - \varphi_{32}) \cdot g_{3132} + (\varphi_{31} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P231} &= -\frac{dI_{31}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P1}}{r_{P31}} + (\varphi_{P1} - \varphi_{31}) \cdot g_{P131} + (\varphi_{P1} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P1P2} + (\varphi_{P1} - \varphi_{32}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{P1}}{dx} \\ \frac{\varphi_{32}}{r_{332}} + (\varphi_{32} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P232} + (\varphi_{32} - \varphi_{31}) \cdot g_{3132} + (\varphi_{32} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{32}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P2}}{r_{P32}} + (\varphi_{P2} - \varphi_{32}) \cdot g_{P232} + (\varphi_{P2} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P1P2} + (\varphi_{P2} - \varphi_{31}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{P2}}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (2.25)$$



- где  $\varphi_{31}, \varphi_{32}$  – потенциалы заземлителей первого и второго пути соответственно, В;
- $\varphi_{P1}, \varphi_{P2}$  – потенциалы рельсовых сетей первого и второго пути соответственно, В;
- $I_{31}, I_{32}$  – токи заземлителей первого и второго пути соответственно, А;
- $I_{P1}, I_{P2}$  – токи рельсовых сетей первого и второго пути соответственно, А;
- $r_{31}, r_{32}$  – продольные сопротивления заземлителей первого и второго пути соответственно, Ом/км;
- $r_{P1}, r_{P2}$  – продольные сопротивления рельсовой сети первого и второго пути соответственно, Ом/км;
- $r_{331}, r_{332}$  – переходные сопротивления заземлителей первого и второго пути соответственно, Ом·км;
- $r_{P31}, r_{P32}$  – переходные сопротивления рельсовой сети первого и второго пути соответственно, Ом·км;
- $g_{P131}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью первого пути и заземлителем первого пути, См/км;
- $g_{P132}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью первого пути и заземлителем второго пути, См/км;
- $g_{P231}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью второго пути и заземлителем первого пути, См/км;
- $g_{P232}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью второго пути и заземлителем второго пути, См/км;
- $g_{3132}$  – взаимная проводимость между заземлителем первого пути и заземлителем второго пути, См/км;
- $g_{P1P2}$  – взаимная проводимость между рельсовой сетью первого пути и рельсовой сетью второго пути, См/км.

Учитывая громоздкость общего решения для предыдущего случая, далее общее решение для (2.25) не приводится. В целом систему (2.25) целесообразно решать численными методами, поскольку корректное задание всех граничных

условий для определения постоянных интегрирования искомым функций аналитическим путем является очень трудоемкой задачей.

Далее необходимо рассмотреть граничные условия. По аналогии с однопутным участком основные граничными условия будут задаваться в местах расположения тяговых подстанций и электровозов.

В месте расположения тяговой подстанции предполагается подключение рельсовых сетей и заземлителей обоих путей к «-» шине тяговой подстанции. Исходя из этого, схема замещения примет вид

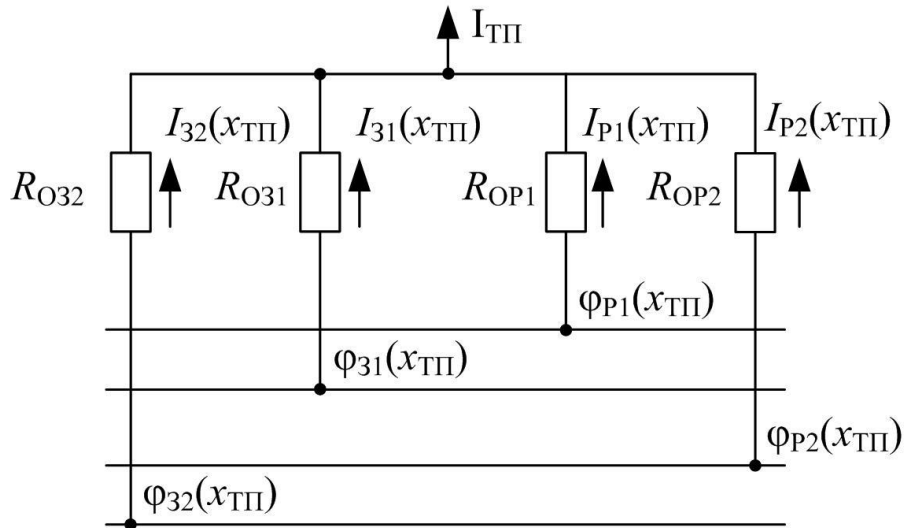


Рисунок 2.21 – Схема замещения подключения рельсовых сетей и протяженных заземлителей к тяговой подстанции на двухпутном участке

Для схемы замещения по рисунку 2.21 можно записать систему уравнений по законам Кирхгофа

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{П1}(x_{ТП}) &= R_{ОП1} \cdot I_{П1}(x_{ТП}) - R_{О31} \cdot I_{31}(x_{ТП}) + \varphi_{31}(x_{ТП}) \\ \varphi_{П2}(x_{ТП}) &= R_{ОП2} \cdot I_{П2}(x_{ТП}) - R_{О32} \cdot I_{32}(x_{ТП}) + \varphi_{32}(x_{ТП}) \\ \varphi_{П2}(x_{ТП}) &= R_{ОП2} \cdot I_{П2}(x_{ТП}) - R_{ОП1} \cdot I_{П1}(x_{ТП}) + \varphi_{П1}(x_{ТП}) \\ I_{П1}(x_{ТП}) + I_{П2}(x_{ТП}) + I_{31}(x_{ТП}) + I_{32}(x_{ТП}) &= I_{ТП} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Решая систему уравнений (2.26) можно определить величину токов рельсов и протяженных заземлителей для конкретного расположения подстанции.

Второй тип граничного условия задается в месте расположения электровоза аналогично случаю, рассмотренному в разделе 2.3.

На многопутных участках железных дорог применяется такое устройство как междупутный рельсовый соединитель призванный снизить сопротивление обратной тяговой сети. Этот элемент также необходимо учитывать при задании граничных условий. Важным фактором является расстояние между соседними междупутными соединителями. Чем чаще они устанавливаются, тем меньше сопротивление обратной тяговой сети и тем ближе по величине потенциалы рельсов обоих путей. При этом напрямую влияния на потенциал заземлителя соединители оказывать не будут. Сформулировать граничное условие в месте расположения междупутного соединителя можно с помощью следующей схемы замещения

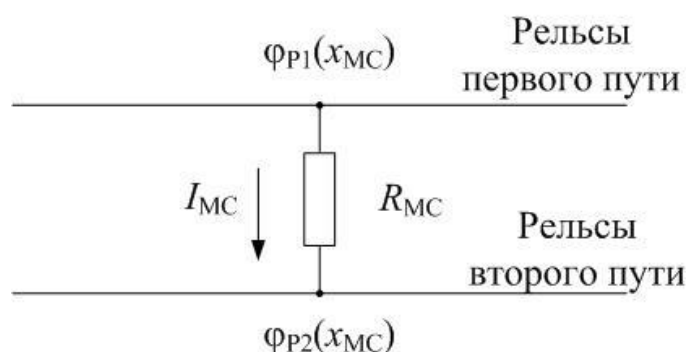


Рисунок 2.22 – Схема замещения междупутного соединителя

Применив к схеме по рисунку 2.22 второй закон Кирхгофа для участка цепи можно выразить величину тока соединителя  $I_{MC}$

$$\varphi_{P1}(x_{MC}) = -I_{MC} \cdot R_{MC} + \varphi_{P2}(x_{MC}), \quad (2.27)$$

где  $R_{MC}$  – сопротивление междупутного соединителя, Ом;

$x_{MC}$  – координата расположения междупутного соединителя, км.

Соответственно ток соединителя будет вытекать из рельсов одного из путей и втекать в другой в зависимости от соотношения потенциалов рельсов первого и второго путей в этой точке.

При использовании численных методов расчета появляется возможность учитывать стекание тока с опор, присоединяемых к протяженному заземлителю. При этом граничные условия в месте расположения опоры будут определяться величиной стекающего тока, величину которого можно найти по аналогии с током междупутного соединителя. Разница будет заключаться в том, что ток будет прямо пропорционален не разности потенциалов элементов, а потенциалу протяженного заземлителя. В этом случае необходимо знать сопротивление опоры. Подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 2.1.

По аналогии с однопутным участком, места расположения тяговых подстанций, электровозов и междупутных соединителей будем называть характерными точками. Описанные выше условия, применяемые на двухпутных участках, необходимо задавать во всех характерных точках. Наличие междупутных соединителей значительно усложняет процесс задания граничных условий в силу того, что на участке может быть несколько соединителей. Все выше сказанное подтверждает целесообразность применения численных методов для исследования системы «рельсы-протяженный заземлитель» как на однопутных, так и на двухпутных участках постоянного тока [118].

## **2.6 Математическая модель системы «рельсы – протяженный заземлитель» при различных вариантах конструктивного исполнения**

Выше была рассмотрена обобщенная математическая модель системы «рельсы – протяженный заземлитель». В зависимости от варианта конструктивно-

го исполнения математическая модель может приобретать различные особенности.

Варианты конструктивного исполнения протяженного заземляющего устройства были описаны в главе 1. Принципиальное различие этих вариантов заключается в том, выполнен ли протяженный заземлитель в виде подземного горизонтального электрода или в виде воздушного провода, объединяющего опоры.

Различие выражается в изменении схемы замещения системы «рельсы – протяженный заземлитель». Для случая использования воздушного провода справедлива схема замещения на рисунке 2.19. Особенность будет заключаться в том, что при использовании воздушного провода переходное сопротивление  $r_{зз}$  будет принимать очень большие значения из-за того, что провод будет связан с удаленной землей через сопротивление железобетонных опор с учетом их сопротивления растеканию. В первом приближении его можно принять равным бесконечности. Взаимная проводимость между рельсовой сетью и протяженным заземлителем  $g_{рз}$  в этом случае наоборот может быть принята равной 0, поскольку непосредственной связи между рельсовой сетью и воздушным проводом нет. Тогда система уравнений (2.20) примет вид

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx}; & I_p r_p &= -\frac{d\varphi_p}{dx}; \\ 0 &= \frac{dI_3}{dx}; & -\frac{\varphi_p}{r_{рз}} &= \frac{dI_p}{dx} \end{aligned} \right\}. \quad (2.28)$$

В случае с использованием горизонтального электрода расположенного в земле необходимо учитывать особенности работы заземляющих устройств [14]. Основная особенность заключается во взаимосвязи между горизонтальным электродом и землей. Из теории заземлителей известно, что увеличение длины заземлителя должно приводить к снижению его сопротивления, поскольку металл заземлителя практически не участвует в проведении тока [14]. Таким образом, схема замещения горизонтального электрода должна удовлетворять этому условию.

Очевидно, что первичными параметрами горизонтального электрода как длинной линии будут также являться продольные и переходные сопротивления на единице длины. Для определения этих величин рассмотрим цилиндрический горизонтальный электрод в цилиндрической системе координат по рисунку 2.23 [14].

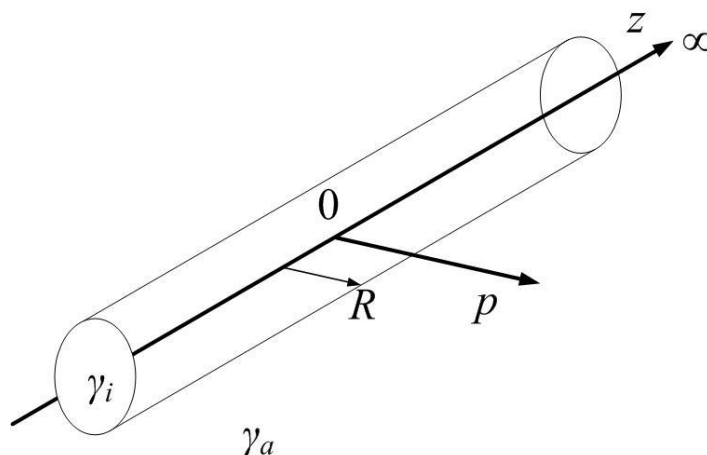


Рисунок 2.23 – Горизонтальный цилиндрический электрод в цилиндрической системе координат

Электрод, радиусом  $R$ , располагается в однородном пространстве с проводимостью  $\gamma_a$  и распространяется в обе стороны от начала координат (точка 0) в бесконечность. Ток  $I$  приложен в начале координат, материал заземлителя обладает проводимостью  $\gamma_i$ .

Величина потенциала  $\varphi$  будет определять электрическое поле вокруг рассматриваемого электрода. Определить его можно используя уравнение Лапласа в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{p} \frac{\partial \varphi}{\partial p} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial p^2} = 0, \quad (2.29)$$

В этом случае необходимо различать электрический потенциал внутри электрода  $\varphi_i$  и в окружающем пространстве  $\varphi_a$ . На границе раздела сред потенциалы связаны граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_a, \text{ при } p = R \\ \gamma_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial p} &= \gamma_a \frac{\partial \varphi_a}{\partial p} \end{aligned} \right\}. \quad (2.30)$$

Кроме этого, при  $p \rightarrow \infty$  и  $z \rightarrow \infty$  потенциалы  $\varphi_i$  и  $\varphi_a$  должны стремиться к 0, что следует из свойств потенциальной функции.

Используя метод разделения переменных можно получить решение (2.29) в следующем виде

$$\varphi(z, p) = \varphi(p)\varphi(z). \quad (2.31)$$

Подставив (2.31) в (2.29) получим

$$\frac{1}{\varphi(p)} \frac{\partial^2 \varphi(p)}{\partial p^2} + \frac{1}{p \cdot \varphi(p)} \frac{\partial \varphi(p)}{\partial p} = - \frac{1}{\varphi(z)} \frac{\partial^2 \varphi(z)}{\partial z^2}. \quad (2.32)$$

Поскольку левая и правая части равны, то их можно приравнять к одной константе, например  $\lambda^2$ . Тогда уравнение (2.32) преобразуется в два линейных дифференциальных уравнения второго порядка, общие решения которых будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \varphi(p) &= A_1 \cdot e^{-(1-\sqrt{1+\lambda^2 p^2})} + B_1 \cdot e^{-(1+\sqrt{1+\lambda^2 p^2})} \\ \varphi(z) &= A_2 \cdot e^{\lambda z} + B_2 \cdot e^{-\lambda z} \end{aligned} \right\}. \quad (2.33)$$

Учитывая граничные условия (2.30), свойство потенциальной функции, а также условие  $\varphi(z \rightarrow 0) = \varphi$  окончательно, с учетом (2.31) получим

$$\varphi(z, p) = \varphi_a \cdot e^{(\sqrt{1+\lambda^2 R^2} - \sqrt{1+\lambda^2 p^2} - \lambda z)}. \quad (2.34)$$

В дальнейшем необходимо определить постоянную  $\lambda$ , для чего необходимо рассмотреть изменение потенциальной функции на границе двух сред при приращении координат на бесконечно малые элементы  $\Delta p$  и  $\Delta z$  (рисунок 2.24). В этом случае приращение площади поверхности цилиндра составит  $\Delta s = 2\pi \cdot \Delta z \cdot (p + \Delta p)$ .

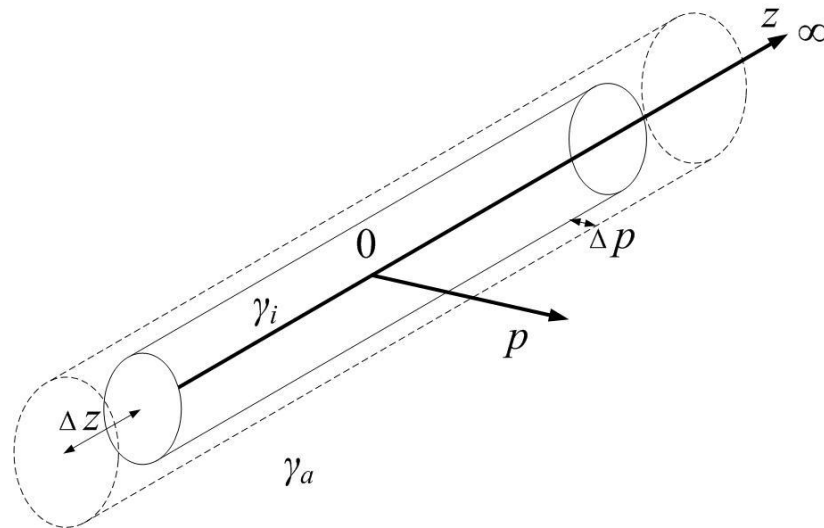


Рисунок 2.24 – Приращение протяженного заземляющего электрода

В дальнейшем будем считать, что приращение плотности тока в окружающем пространстве пропорционально приращению площади цилиндра. В этом случае справедливы следующие соотношения

$$\left. \begin{aligned} j_{\Delta s} &= \frac{\Delta I}{2\pi \cdot \Delta z \cdot (p + \Delta p)} \\ j_{\Delta z} &= \frac{\Delta I}{2\pi \cdot \Delta z \cdot p} \end{aligned} \right\}. \quad (2.35)$$



Второе соотношение – приращение линейной плотности тока, определяемое в свою очередь приращением линейного тока  $\Delta J = \Delta I / \Delta z$ . Тогда соотношения (2.35) примут вид

$$j_{\Delta s} = \frac{\Delta J}{2\pi \cdot (p + \Delta p)}, \quad j_{\Delta z} = \frac{\Delta J}{2\pi \cdot p}. \quad (2.36)$$

Согласно закону Ома в дифференциальной форме напряженность электрического поля в проводящем пространстве с удельной проводимостью  $\gamma_a$  будет определяться выражениями

$$E_{\Delta s} = \frac{\Delta J}{2\pi \cdot (p + \Delta p) \cdot \gamma_a}, \quad E_{\Delta z} = \frac{\Delta J}{2\pi \cdot p \cdot \gamma_a}. \quad (2.37)$$

Учитывая предельное соотношение:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta z} = \frac{dI}{dz} = dJ(z), \quad (2.38)$$

пренебрегая бесконечно малым слагаемым в знаменателе, найдем

$$\lim_{\Delta p \rightarrow 0} \Delta E = dE = \frac{dJ(z)}{2\pi \cdot p \cdot \gamma_a} - \frac{dJ(z)}{2\pi \cdot (p + \Delta p) \cdot \gamma_a} = dJ(z) \frac{dp}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot p^2}. \quad (2.39)$$

Окончательно напряженность электрического поля в проводящем пространстве с удельной проводимостью  $\gamma_a$  будет определена интегрированием (2.39) по  $p$ , учитывая, что при  $p \rightarrow \infty$ ,  $E=0$ :

$$E = \frac{dJ(z)}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot p}. \quad (2.40)$$

Потенциальная функция может быть определена как двойной интеграл по осям  $p$  и  $z$  от выражения (2.40)

$$\varphi(p, z) = \iint_{z, p} -\frac{dJ(z)}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot p} dz dp = -\frac{1}{2\pi \cdot \gamma_a} [dJ(z) \ln p + \frac{dI(z)}{p} + C]. \quad (2.41)$$

Используя (2.41) можно выразить потенциальную функция по оси  $z$

$$\varphi_a(z) = -\frac{1}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot p} \int \frac{dI(z)}{dz} dz = -\frac{dI(z)}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot p} \quad (2.42)$$

Напряженность электрического поля внутри проводника с удельной проводимостью  $\gamma_i$  будет определяться соотношением

$$E(z) = \frac{d\varphi(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_i}, \quad (2.43)$$

откуда

$$\varphi_i(z) = \int E(z) dz = -\frac{1}{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_i} \int I(z) dz \Rightarrow \frac{d\varphi_i(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_i}. \quad (2.44)$$

Учитывая  $\varphi(z) = \varphi_i(z) + \varphi_a(z)$  получим

$$\frac{d\varphi(z)}{dz} = -\frac{I(z)}{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_i} - \frac{I(z)}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot R \cdot z}. \quad (2.45)$$

Из (2.45) можно выразить продольное сопротивление электрода с удельной проводимостью  $\gamma_i$ , лежащего в проводящем пространстве с удельной проводимостью  $\gamma_a$

$$r_3 = \frac{2 \cdot \gamma_a \cdot z + R \cdot \gamma_i}{2\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_a \cdot \gamma_i \cdot z}. \quad (2.46)$$

При  $z \rightarrow \infty$  (2.46) примет вид

$$r_3 = \frac{1}{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma_i}. \quad (2.47)$$

Из (2.42) по закону Ома можно определить сопротивление поверхности цилиндра на единице длины  $z$  в пространстве с проводимостью  $\gamma_a$

$$r_{\Pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \gamma_a \cdot R}. \quad (2.48)$$

Окончательно входное сопротивление бесконечно длинного цилиндрического проводника с утечкой тока в проводящее пространство земли определяется соотношением

$$r_{\text{ВХ}} = \frac{\sqrt{r_3 \cdot r_{\Pi}}}{2} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi \cdot R \sqrt{\gamma_i \gamma_a}}. \quad (2.49)$$

Аналогично величина  $\lambda$ , представляющая собой коэффициент распространения, будет определяться выражением

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_3}{r_{\Pi}}} = \frac{\sqrt{2}}{R} \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_i}}. \quad (2.50)$$

Используя выражение (2.44), на основании теории заземлителей можно определить входное сопротивление цилиндрического электрода, простирающегося в бесконечность и расположенного одним концом в начале координат, как удвоенную величину входного сопротивления аналогичного электрода, простирающегося в бесконечность по обе стороны от начала координат.

На основании вышесказанного, схема замещения системы «рельсы-протяженный заземлитель» применительно к горизонтальному электроду, расположенному под землей примет вид, представленный на рисунке 2.25.

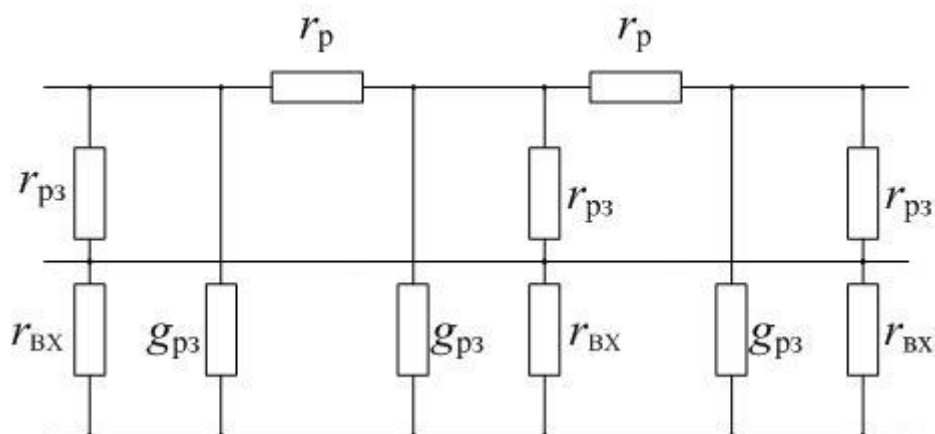


Рисунок 2.25 – Схема замещения системы «рельсы-протяженный заземлитель» при использовании цилиндрического горизонтального электрода

### Выводы по второй главе

1) Разработаны трехмерные модели различных железобетонных конструкций, применяемых в контактной сети. Трехмерное моделирование позволило учесть конфигурацию металлической арматуры конструкций. С помощью метода конечных элементов было определено электрическое сопротивление конструкций с учетом сопротивления растеканию при различных удельных сопротивлениях грунта и бетона.

2) При компьютерном моделировании железобетонных конструкций было рассмотрено влияние наличия гидроизоляции и ее целостности. В результате было выявлено, что гидроизоляция сильно повышает сопротивление конструкций: сопротивление не отдельной опоры без гидроизоляции варьируется от 100 до 600 Ом, при ее наличии оно достигает 60-140 кОм; у отдельной опоры без гидроизоляции – 150-700 Ом, с гидроизоляцией – 40-190 кОм.

3) Введено понятие взаимной проводимости между элементами системы «рельсы-протяженный заземлитель».

4) Разработана численная модель, позволяющая определить взаимную проводимость элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» для одно- и двухпутного участков, а также определить переходные сопротивления рельсовой сети и протяженного заземлителя. С помощью численной модели указанные величины были определены при различных удельных сопротивлениях грунта, материала балласта и шпал. Результаты сведены в таблицы и представлены в приложении А.

5) Предложена математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель», основанная на математической модели «рельсы-земля» и позволяющая оценить распределение потенциалов и токов в этой системе. Недостаток модели заключается в том, что в ней не учитывается взаимное влияние элементов системы друг на друга.

6) Рассмотрен случай расположения тяговых подстанций и электровоза на однопутном участке. Представлено описание граничных условий, которые позволили получить аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающей распределение потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» для конкретного случая.

7) Предложена математическая модель системы для случая двухпутного участка постоянного тока, которая учитывает возможность протекания токов между рельсами и заземлителями смежных путей.

8) Сложность модели двухпутного участка привела к необходимости численного решения системы дифференциальных уравнений, что позволило расширить граничные условия. Дано описание граничных условий в местах расположения междупутных соединителей, а также условие, описывающее протекание тока через опоры контактной сети.

9) Рассмотрены особенности схемы замещения системы «рельсы-протяженный заземлитель» для двух вариантов исполнения протяженного заземлителя: воздушный провод и горизонтальный электрод, расположенный под землей.

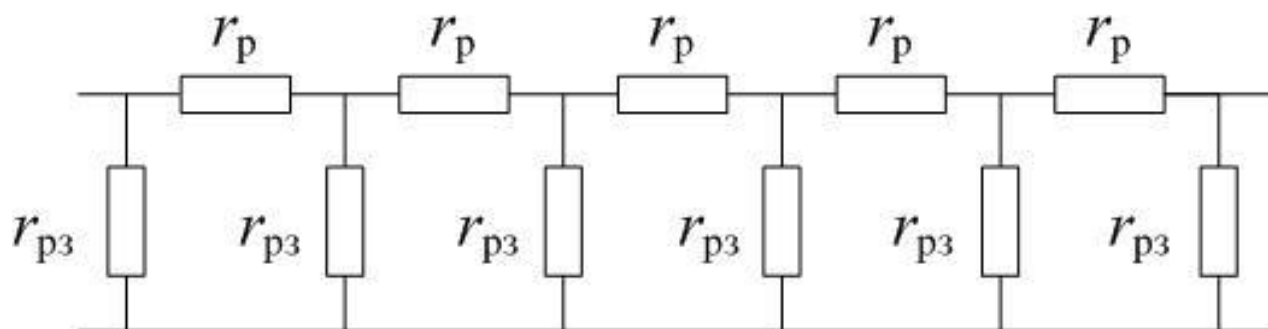
### **3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ «РЕЛЬСЫ-ЗЕМЛЯ» И «РЕЛЬСЫ-ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ»**

#### **3.1 Физическая аналоговая модель участка постоянного тока**

Как известно рельсовая сеть электрифицированного транспорта не изолирована от земли, в силу чего протекающие по рельсам тяговые и сигнальные токи могут стекать в землю. Исходя из этого, было введено понятие переходного сопротивления рельсов относительно удаленной земли, или переходное сопротивление «рельсы-земля». Принято полагать, что это сопротивление также включает в себя удельное сопротивление земли [19]. Таким образом, рельсы, как протяженный проводник, располагаемый на поверхности земли характеризуется в продольном направлении погонным сопротивлением рельсового пути, а в поперечном направлении – переходным сопротивлением «рельсы-земля», исходя из чего можно составить схему замещения рельсовой сети однопутного участка (рисунок 3.1)

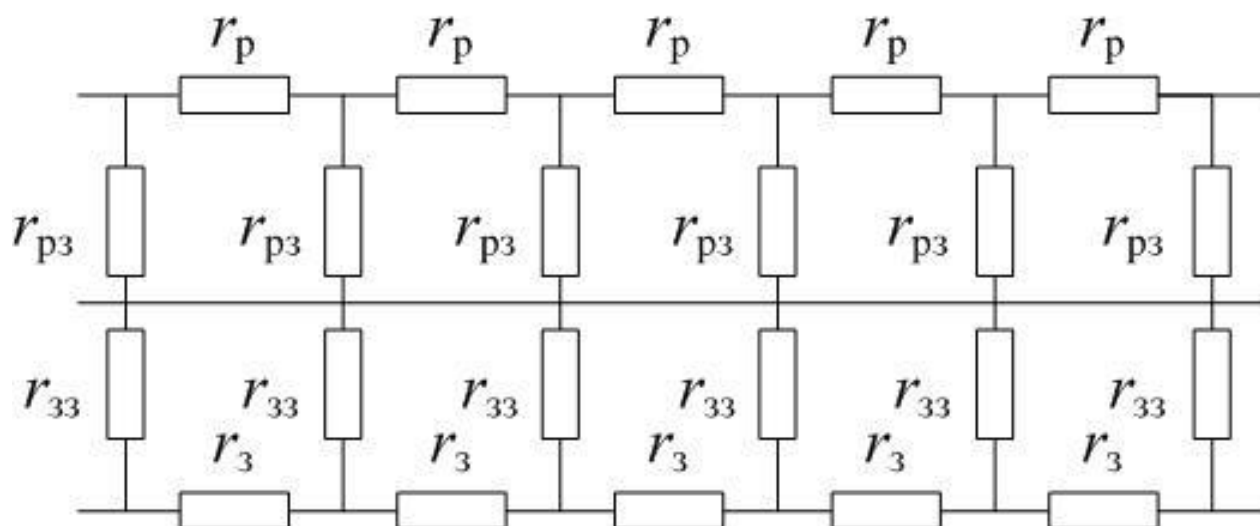
Собственно рельсовая сеть рассматривается как цепная схема, характеризующаяся погонным сопротивлением рельсов и переходным сопротивлением «рельсы-земля» на каждом звене. В зависимости от того, на единицу какой длины задаются указанные параметра, будет изменяться количество звеньев на рассматриваемом участке.

Протяженный заземлитель, выполненный в виде заземляющего провода, по сути своей характеризуется теми же параметрами, что и рельсовая сеть: в продольном направлении – погонное сопротивление металла заземлителя, в поперечном – переходное сопротивление «заземлитель-земля». Учитывая вышесказанное, можно составить схему замещения для однопутного участка, оборудованного протяженным заземлителем (рисунок 3.2)



$r_p$  – погонное сопротивление рельсов, Ом/км;  
 $r_{pз}$  – переходное сопротивление «рельсы-земля», Ом·км.

Рисунок 3.1 – Схема замещения рельсовой сети однопутного участка



$r_p$  – погонное сопротивление рельсов, Ом/км;  
 $r_{pз}$  – переходное сопротивление «рельсы-земля», Ом·км;  
 $r_з$  – погонное сопротивление заземлителя, Ом/км;  
 $r_{зз}$  – переходное сопротивление «заземлитель-земля», Ом·км.

Рисунок 3.2 – Схема замещения рельсовой сети и протяженного заземлителя

Таким образом, представленная схема также представляет собой цепную схему, состоящую из более сложных звеньев по сравнению со схемой на рисунке 3.1.

Для системной оценки величин электрических параметров, характеризующих показатели рельсовой сети и систем заземления опор, целесообразно исполь-

зовать метод физического моделирования в виде метода прямой аналогии с помощью цепных схем, который позволяет экспериментальным методом оценить исследуемые параметры.

С развитием компьютерных технологий физическое моделирование при изучении различных явлений все чаще стало заменяться математическими моделями. Несмотря на это физический эксперимент не может быть полностью заменен математическим [119].

Существенно ускоряя и удешевляя исследовательские работы, серьезное математическое моделирование должно заканчиваться экспериментальной проверкой полученных результатов. Поэтому методология теории подобия, изначально разрабатываемая для случаев физического моделирования, до сих пор не теряет своей актуальности.

Исходя из вышесказанного, возникает необходимость проверки как аналитических выкладок, так и численных решений с целью их подтверждения и обоснования их дальнейшего использования. Критерием проверки будет являться совпадение с результатами физического моделирования.

При физическом моделировании модель и проходящие в ней процессы имеют полностью или в основном одинаковую с оригиналом физическую природу. Физическая модель может представлять собой более или менее точную копию оригинала или какого-то его элемента.

В современной интерпретации первую теорему подобия можно сформулировать следующим образом: подобные явления описываются функционально одинаковыми уравнениями, которые инвариантны по отношению к подобным преобразованиям входящих в них величин [120].

Вторая теорема подобия утверждает: любое уравнение физического явления, записанное в определенной системе единиц, может быть выражено в виде зависимости между безразмерными соотношениями, представляющими собой критерии подобия и составленными из входящих в уравнение величин.

Некоторые из базисных величин можно выбрать произвольно, остальные должны быть выражены через них с помощью анализа размерностей.



В этом случае под независимыми единицами измерения величин понимаются такие единицы, показатели размерностей которых не могут быть получены посредством умножения, деления или возведения в степень размерностей остальных независимых единиц. Количество  $k$  независимых единиц меньше или равно числу  $q$  основных единиц измерения в выбранной системе единиц измерения ( $k \leq q$ ) [121].

Одним из способов определения критериев подобия является метод интегральных аналогов, который основан на анализе дифференциальных уравнений, описывающих состояние моделируемой системы.

Для участка тяговой сети постоянного тока с сосредоточенной нагрузкой потенциал рельса  $\varphi_p$  на расстоянии  $l$ , ток в рельсах  $I_p$  и параметры рельсовой линии:  $r_{p3}$  – переходное сопротивление «рельсы-земля» и  $r_p$  – погонное сопротивление рельсовой сети связаны следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_p}{dl} &= -I_p r_p \\ \frac{dI_p}{dl} &= -\frac{\varphi_p}{r_{p3}} \end{aligned} \right\}. \quad (3.1)$$

Из анализа уравнений (3.1) методом интегральных аналогов [120] получено два критерия подобия [122]:

$$\frac{\varphi_p}{l \cdot r_p \cdot I_p} = \frac{\varphi'_p}{l' \cdot r'_p \cdot I'_p} = \text{idem}; \quad (3.2)$$

$$\frac{I_p \cdot r_{p3}}{l \cdot \varphi_p} = \frac{I'_p \cdot r'_{p3}}{l' \cdot \varphi'_p} = \text{idem}. \quad (3.3)$$

Индексы у параметров в соотношениях (3.2) и (3.3) относятся к модели, а определение *idem* означает, что безразмерные соотношения идентичны для реаль-

ного устройства и модели и представляют собой два критерия подобия в соответствии с первой теоремой теории подобия. В соответствии со второй теоремой ( $\pi$ -теоремой) о подобии, окончательно критерии подобия  $\pi$  и соотношения масштабов моделирования выражаются соотношениями:

$$\frac{m_\varphi}{m_l \cdot m_r \cdot m_I} = 1; \quad (3.5)$$

$$\frac{m_I \cdot m_r}{m_l \cdot m_\varphi} = 1, \quad (3.6)$$

где  $m_\varphi$  – масштаб потенциала;

$m_l$  – масштаб длины;

$m_I$  – масштаб тока;

$m_r$  – масштаб сопротивлений.

Число независимых параметров из четырех исследуемых определяется из анализа матрицы размерностей.

Проанализируем матрицу размерностей величин, входящих в критерии подобия (3.5) и (3.6). Составим формулы размерностей этих величин

$$\begin{aligned} [\varphi] &= [L^2 M^1 T^{-3} I^{-1}] \\ [l] &= [L^1 M^0 T^0 I^0] \\ [r] &= [L^2 M^1 T^{-3} I^{-2}] \\ [I] &= [L^0 M^0 T^0 I^1] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Составив матрицу размерностей из показателей степеней основных единиц можно убедиться, что ранг такой матрицы равен трем, следовательно, три параметра из пяти можно считать независимыми. В качестве независимых параметров примем  $r$ ,  $\varphi$  и  $I$ . Тогда масштаб  $l$  будет определяться следующим выражением

$$m_l = \frac{m_r \cdot m_I}{m_\phi}. \quad (3.8)$$

В основе предлагаемой физической аналоговой модели участка железной дороги постоянного тока лежит стенд производства ИПЦ «Учебная техника» г. Челябинск (рисунок 3.3). Структура модели включает блоки тяговых подстанций, участков тяговой сети и электровозов, блоки резисторов, в виде цепных схем, моделирующих покилометровые участки контактной сети, рельсовой сети, протяженного заземлителя и переходных сопротивлений «рельсы-земля» и «заземлитель-земля».

Моделирование тяговой нагрузки осуществляется подключением модели электровоза на соответствующий километр рассматриваемого участка между контактной и рельсовой сетью. Ток электровоза моделируется с помощью стабилизированного источника напряжения и ступенчато регулируется.

Тяговые подстанции оборудованы четырьмя питающими фидерами, а также фидером обратного тока, кроме того у каждой подстанции может независимо регулироваться напряжение холостого хода и сопротивление.

Общая длина моделируемого участка может достигать 78 км, при этом одновременно может быть смоделировано до 4 тяговых подстанций, а также до 12 электровозов, находящихся на различных межподстанционных зонах.

В качестве измерительного прибора использовался цифровой мультиметр АРРА-305 в режиме милливольметра постоянного тока. Измерение осуществляется путем подключения мультиметра между выводом моделируемой «земли» и выводом рельсовой сети или протяженного заземлителя в соответствующем километре.

При экспериментальном исследовании в соответствии с рисунками 3.1, 3.2 сопротивление земли включается в переходные сопротивления рельсовой сети и протяженного заземлителя, исходя из чего в физической аналоговой модели блок, моделирующий сопротивление земли не используется, а соответствующие выводы закорачиваются.

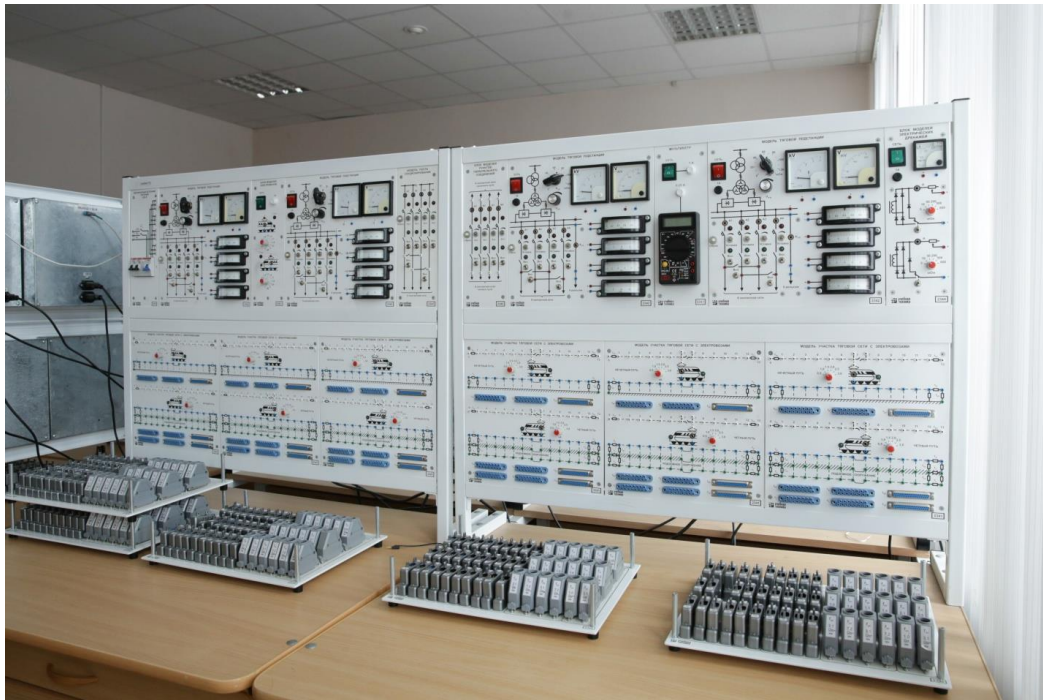


Рисунок 3.3 – Стенд «Модель двухпутного участка железной дороги, электрифицированного на постоянном токе»

В предлагаемой модели используются следующие масштабы моделируемых величин:  $m_\varphi=1/200$ ,  $m_r=1/6 \cdot 10^{-3}$ ,  $m_I = 1/33 \cdot 10^3$ . Таким образом, моделируемое напряжение не превышает 20 В, а моделируемые токи не достигают 1 А. При этом условия (3.5) и (3.6) выполняются, что говорит об аналогичности между моделируемой и реальной системами.

### **3.2 Моделирование системы «рельсы-земля» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока**

В соответствии с рисунком 3.1 в физической аналоговой модели на каждом километре моделируется продольное и поперечное сопротивление рельсовой сети. При этом электровозы могут располагаться в любом километре рассматриваемой межподстанционной зоны.

В дальнейшем будем рассматривать простейший случай: однопутный участок с двумя тяговыми подстанциями и одним электровозом на межподстанционной зоне. При этом реализуется двустороннее питание рассматриваемого участка. Кроме этого важным условием является протяженность рельсов за пределы рассматриваемой зоны, т.е. левее левой и правее правой подстанций. На реальных участках протяженность рельсов очень велика и при расчетах может быть принята равной бесконечности, однако при исследовании на физической аналоговой модели нет возможности смоделировать такой случай. Поэтому для достоверности результатов эксперимента необходимо, чтобы эта протяженность была не меньше, чем длина рассматриваемой межподстанционной зоны. Исходя из вышесказанного схема моделируемого участка примет вид

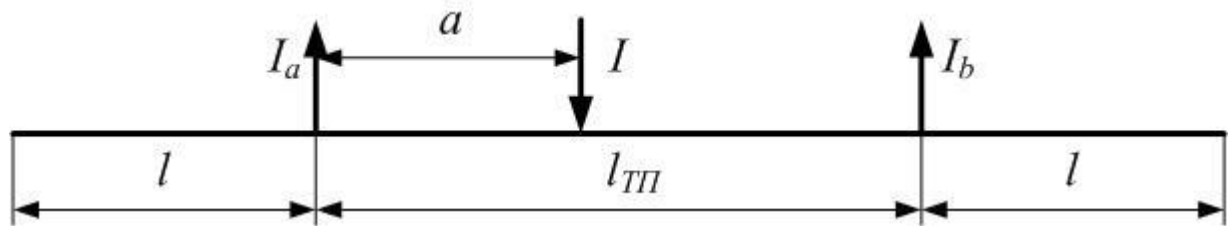


Рисунок 3.4 – Схема моделируемого участка железной дороги постоянного тока

На рисунке 3.4 используются следующие обозначения:  $l$  – протяженность рельсов левее левой и правее правой подстанций, км;  $l_{ТП}$  – длина рассматриваемой межподстанционной зоны, км;  $a$  – расстояние от левой подстанции до электровоза, км;  $I$  – ток электровоза, А;  $I_A$ ,  $I_B$  – токи тяговых подстанций А и Б соответственно, А. При моделировании использовались следующие параметры участка:  $l=26$  км,  $l_{ТП}=20$  км.

При моделировании принимается условие, что рельсовая сеть и контактная подвеска одинаковы по всей длине моделируемого участка.

Для более достоверной оценки сходимости результатов эксперимента и аналитического и численного решений, были рассмотрены несколько вариантов расположения электровоза на рассматриваемом участке, а также несколько вариантов

параметров рельсовой сети. Соответственно вариантов расположения электровоза три:  $a=5$  км.,  $a=10$  км.,  $a=15$  км. Вариантов параметров рельсовой сети два. Вариант 1:  $r_p=18$  мОм/км,  $r_{p3}=0,5$  Ом·км, вариант 2:  $r_p=14$  мОм/км,  $r_{p3}=1$  Ом·км. Соответственно исследование будет проводится для каждого варианта расположения электровоза и для каждого варианта параметров рельсовой сети – в итоге количество опытов будет равно 6.

Собственно результатом эксперимента будет распределение потенциалов рельсов вдоль рассматриваемого участка [123]. В дальнейшем полученные значения будут сравниваться с аналогичными значениями, полученными с помощью аналитического и численного решений. Результаты эксперимента представлены на рисунках 3.5-3.7.

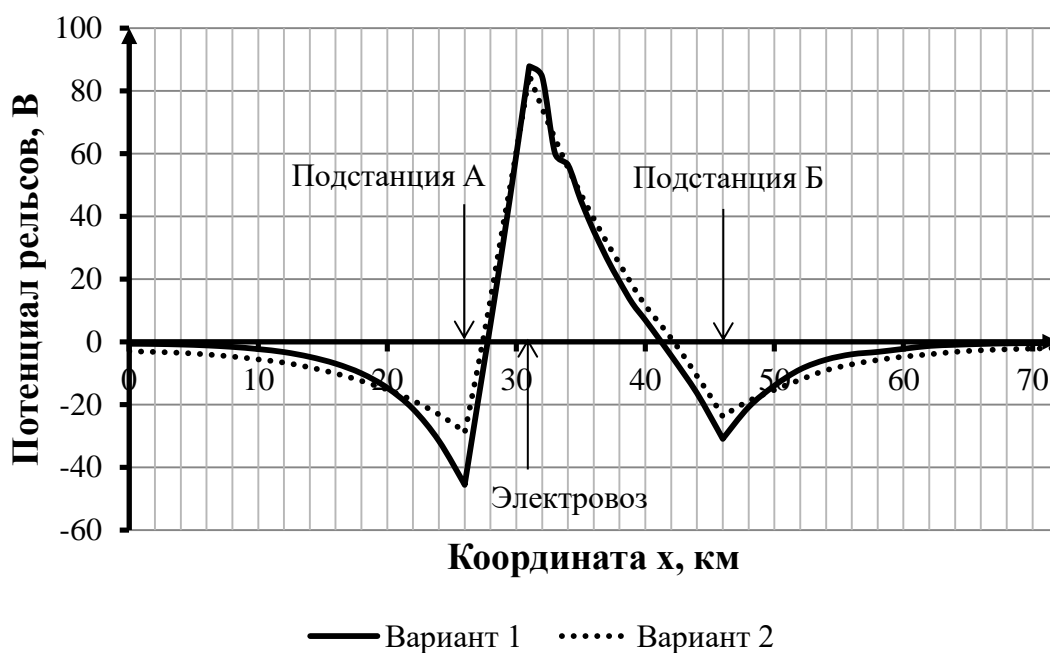


Рисунок 3.5 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

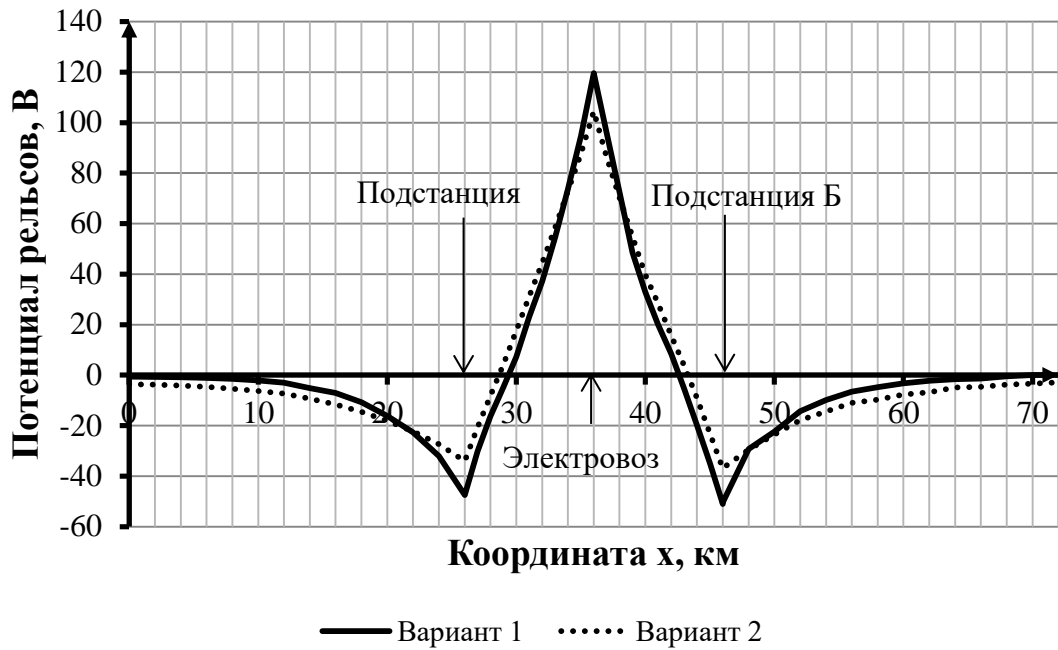


Рисунок 3.6 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

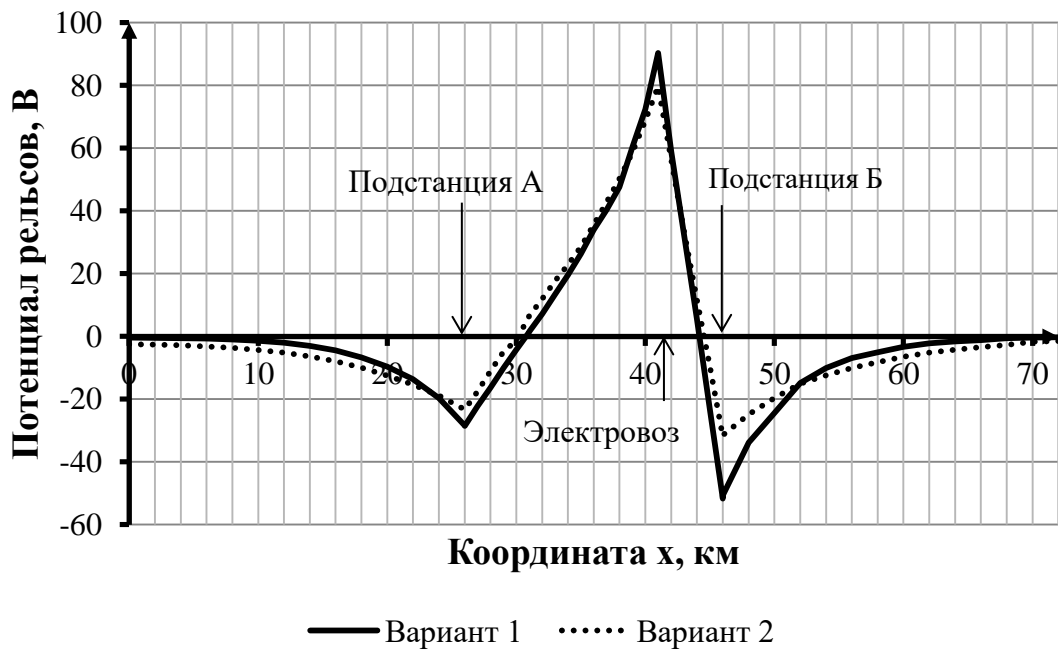


Рисунок 3.7 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

Величина тока электровоза не входит в начальные условия для каждого опыта, поскольку в физической аналоговой модели ток электровоза моделируется с помощью стабилизированного источника напряжения и может незначительно варьироваться при различных режимах работы, поэтому перед каждым опытом необходимо измерять конкретное значение тока электровоза.

При проведении эксперимента величина тока варьировалась от 2856 А до 2858 А в зависимости от расположения электровоза и параметров рельсовой сети, при этом оставаясь неизменной в течение каждого из опытов.

По форме графиков можно убедиться, что физическая аналоговая модель верно отражает физические процессы протекания тока по рельсовой сети: в месте расположения электровоза наблюдается пик потенциала рельсовой сети создающий анодную зону, в которой происходит стекание тока с рельсов. В местах расположения подстанций наблюдается минимум потенциала рельсовой сети, создающий катодную зону, в которой наблюдается втекание тока в рельсовую сеть. При изменении расположения электровоза на рассматриваемом участке происходит перемещение пика потенциала рельсов.

Таким образом, физическая аналоговая модель с большой степенью достоверности отражает физический процесс оригинала.

### **3.3 Моделирование системы «рельсы-протяженный заземлитель» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока**

Система «рельсы-протяженный заземлитель» помимо продольного и поперечного сопротивления рельсовой сети характеризуется продольным и поперечным сопротивлением протяженного заземлителя. По аналогии с системой «рельсы-земля» указанные сопротивления в физической аналоговой модели задаются на каждом километре рассматриваемого участка. Ток тяговой подстанции в этом



случае будет равен сумме тока рельсовой сети и тока протяженного заземлителя. При этом в месте расположения электровоза весь его ток будет втекать в рельсовую сеть, поскольку в этой точке отсутствует локальное металлическое соединение между заземлителем и рельсами.

Схема моделируемого участка будет аналогичной схеме на рисунке 3.4.

При исследовании рассматривались те же варианты расположения электровоза, а также два варианта параметров рельсовой сети и протяженного заземлителя. Вариант 1:  $r_p = 18$  мОм/км,  $r_{p3} = 0,5$  Ом·км,  $r_3 = 108$  мОм/км,  $r_{33} = 1,4$  Ом·км, вариант 2:  $r_p = 12$  мОм/км,  $r_{p3} = 1$  Ом·км,  $r_3 = 49$  мОм/км,  $r_{33} = 3,1$  Ом·км. Сильное отличие продольных сопротивлений рельсовой сети и заземлителя объясняется значительной разницей их сечений, поскольку в качестве заземлителя применяется арматурные стержни малого сечения.

По аналогии с предыдущим случаем, результатом эксперимента является потенциал рельсовой сети и протяженного заземлителя в различных точках моделируемого участка. Собственно результаты представлены на рисунках 3.8-3.13

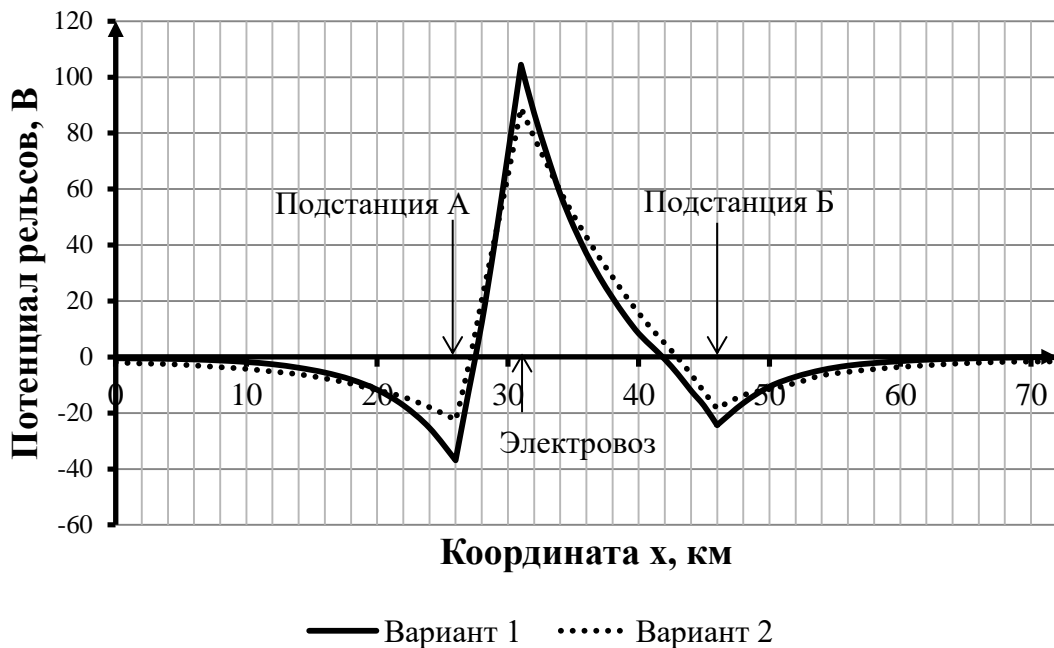


Рисунок 3.8 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

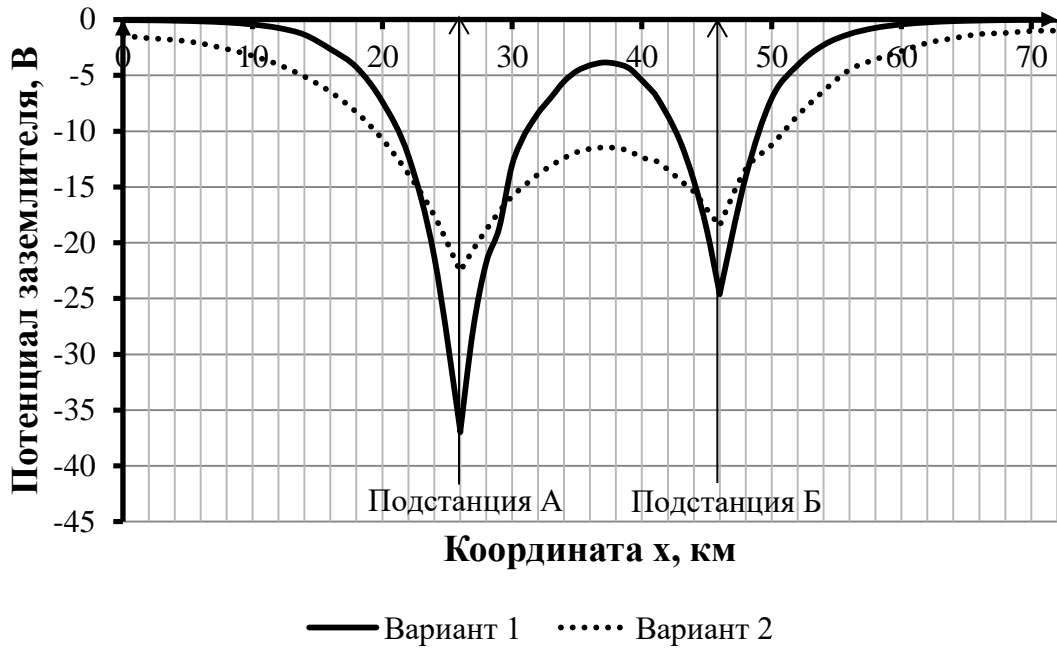


Рисунок 3.9 – Результаты измерений потенциала заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

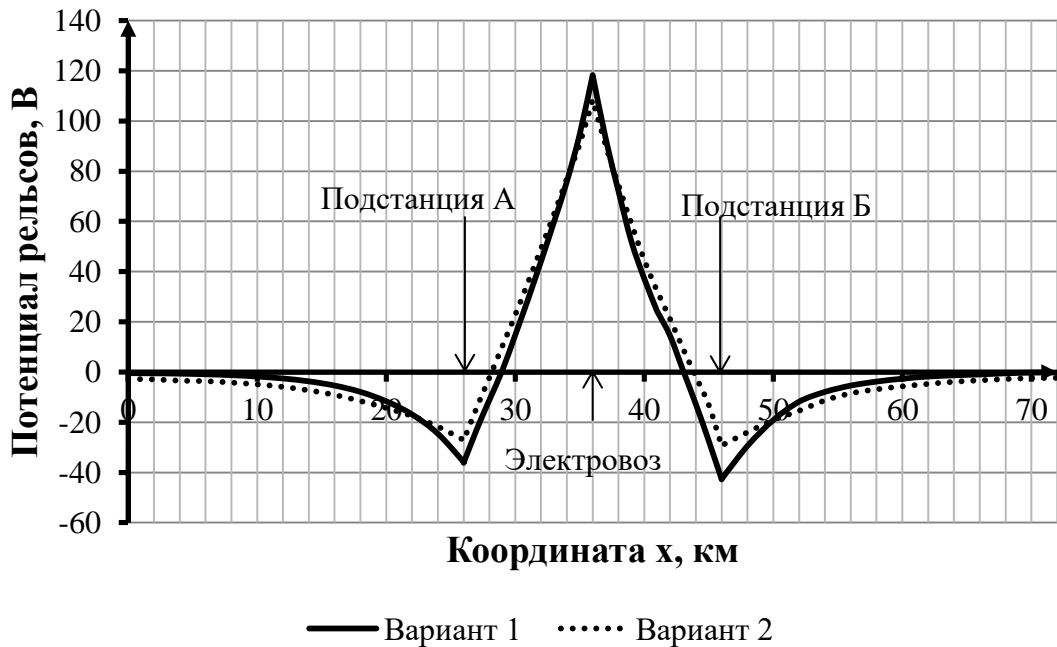


Рисунок 3.10 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

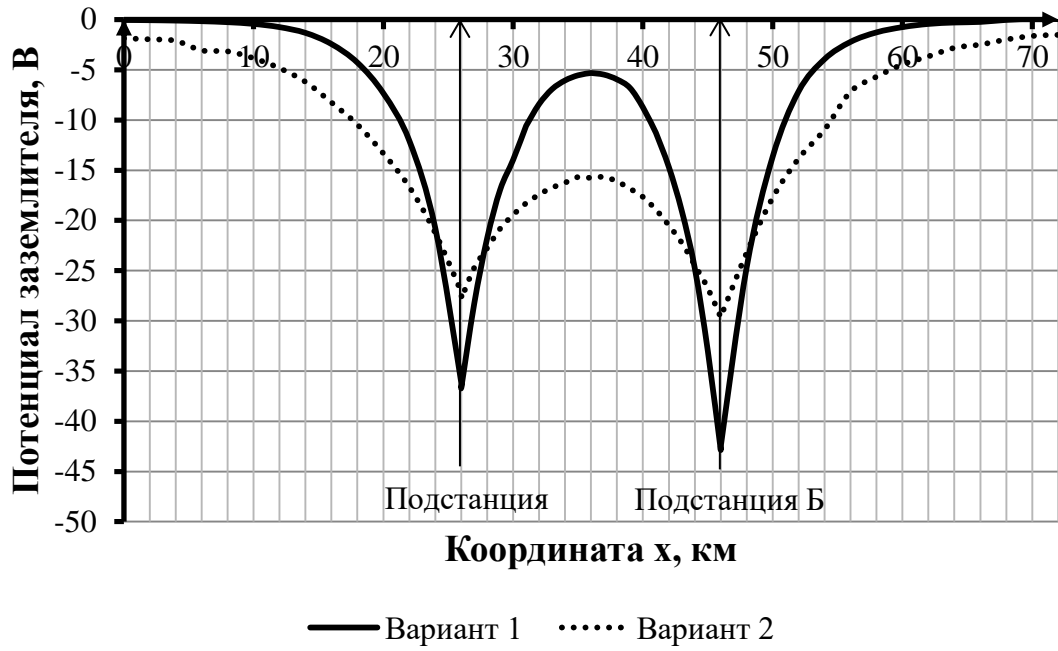


Рисунок 3.11 – Результаты измерений потенциала заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

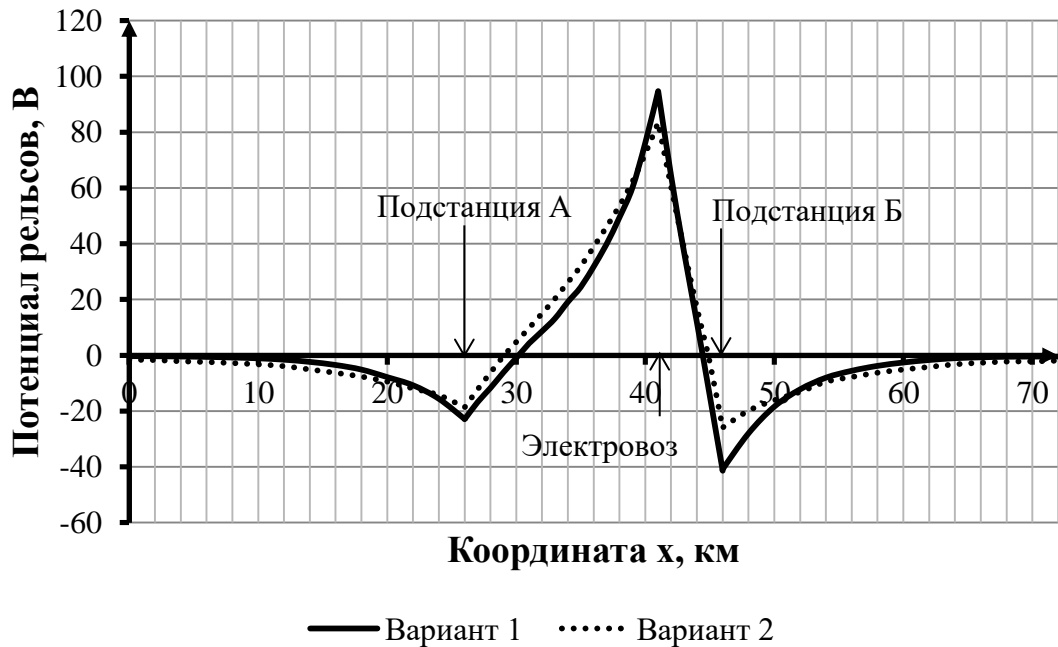


Рисунок 3.12 – Результаты измерений потенциала рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

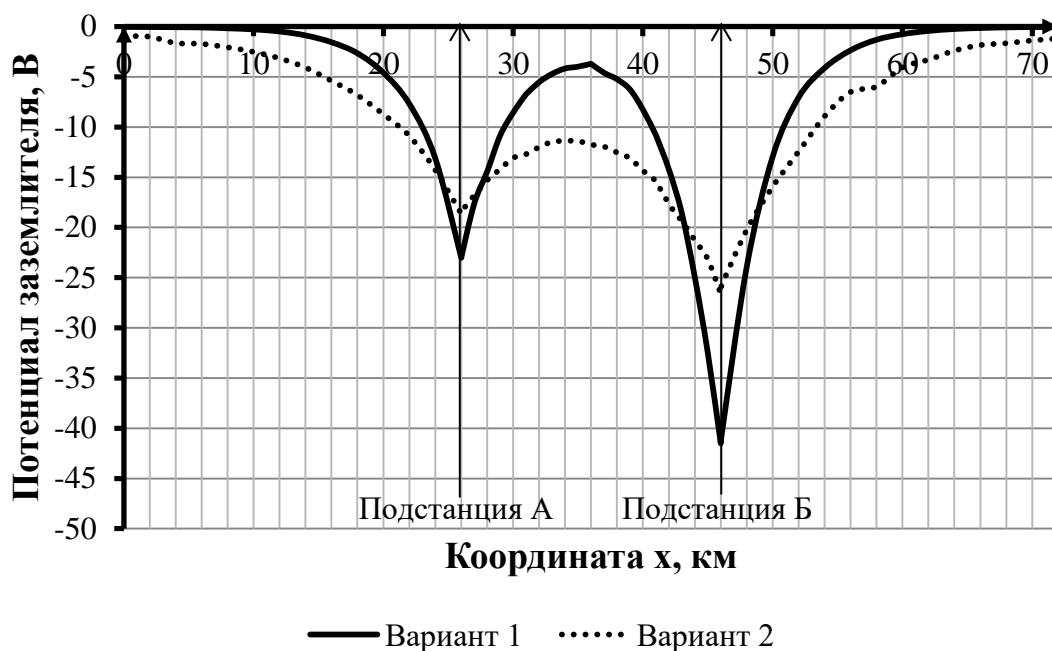


Рисунок 3.13 – Результаты измерений потенциала заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции при двух вариантах параметров рельсовой сети

При моделировании системы «рельсы-протяженный заземлитель» также принимается, что рельсовая сеть, заземлитель и контактная подвеска одинаковы по всей длине рассматриваемого участка.

Ток электровоза варьировался от 2846 А до 2848 А, оставаясь неизменным в каждом отдельном опыте.

Из полученных графиков [123] видно, что при наличии протяженного заземлителя процесс протекания тока по рельсовой сети практически не изменился: также наблюдаются анодные и катодные зоны в местах расположения нагрузок и подстанций соответственно. Потенциал же заземлителя остается отрицательным на всем рассматриваемом участке, что говорит о его катодной поляризации, при этом его максимум располагается примерно в середине межподстанционной зоны при всех вариантах расположения электровоза. Также можно увидеть, что увеличение переходного сопротивления «заземлитель-земля» привело как к снижению максимума, так и к увеличению минимума потенциала заземлителя.

В целом физическая аналоговая модель с большой степенью достоверности отражает процессы происходящие в системах «рельсы-земля» и «рельсы-протяженный заземлитель».

### **3.4 Сравнение аналитического и численного решений с результатами моделирования с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока**

#### **3.4.1 Система «рельсы-земля»**

Аналитическое решение для системы «рельсы-земля» представляет собой решение системы уравнений (3.1) относительно потенциала рельсов. Решение может быть получено исходя из принципа наложения, поскольку рельсовая сеть одинакова по всей длине участка. Однако возможен другой подход, описанный в главе 2, согласно которому рассматриваемый участок разбивается на 4 участка, на каждом из которых задается своя зависимость потенциала рельсов от координаты. Далее все зависимости объединяются в одну систему уравнений на основе общих граничных условий. В итоге, в результате решения полученной системы алгебраических уравнений получают постоянные интегрирования для функции потенциала рельсов на каждом из участков. Итоговая функция потенциала рельсов для всего рассматриваемого участка будет состоять из 4 функций, по количеству участков. Такой метод применим для любого количества электровозов, располагаемых на межподстанционной зоне.

Однако метод является трудоемким, поскольку необходимо решать систему алгебраических уравнений с большим количеством неизвестных. Для случая по рисунку 3.4 необходимо решить систему, состоящую из 8 уравнений, при этом рассматриваемый случай является одним из простейших.

Функция потенциала рельсов может быть описаны аналитическими методом для каждого из участков.

$$\begin{aligned} \Phi_1 = & -\frac{r_p \cdot e^{-\gamma l}}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_a + e^{\gamma(-l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I \\ & - e^{-\gamma l} \cdot I_b + e^{-\gamma(-l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I - e^{\gamma l} \cdot I_b - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_a) \cdot e^{\gamma x} \\ & -\frac{r_p \cdot e^{\gamma l}}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_a + e^{\gamma(-l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I \\ & - e^{-\gamma l} \cdot I_b + e^{-\gamma(-l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I - e^{\gamma l} \cdot I_b - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_a) \cdot e^{-\gamma x}; \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & -\frac{r_p}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} \cdot I_a - e^{-\gamma l_{\text{ТП}}} \cdot I_a \\ & + e^{\gamma(-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I - I_b + e^{-\gamma(-2l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I - e^{2\gamma l} \cdot I_b) \cdot e^{\gamma x} \\ & -\frac{r_p}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (e^{\gamma(-2l-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I \\ & - e^{-2\gamma l} \cdot I_b + e^{-\gamma(-l_{\text{ТП}}+a)} \cdot I - I_b - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} \cdot I_a - e^{\gamma l_{\text{ТП}}} \cdot I_a) \cdot e^{-\gamma x}; \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_3 = & -\frac{r_p}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-I_a - e^{-\gamma(-2l+l_{\text{ТП}})} \cdot I_b \\ & + e^{-\gamma l_{\text{ТП}}} \cdot I_b - e^{2\gamma l} \cdot I_a + e^{-\gamma a} \cdot I + e^{\gamma(a+2l)} \cdot I) \cdot e^{\gamma x} \\ & -\frac{r_p}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{\gamma l_{\text{ТП}}} \cdot I_b \\ & - I_a + e^{-2\gamma l} \cdot I_a + e^{-\gamma(a+2l)} \cdot I + e^{\gamma a} \cdot I - e^{\gamma(2l+l_{\text{ТП}})} \cdot I_b) \cdot e^{-\gamma x}; \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \Phi_4 = & -\frac{r_p \cdot e^{-\gamma l}}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_b - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_b \\ & - e^{\gamma l} \cdot I_a - e^{-\gamma l} \cdot I_a + e^{-\gamma(l+a)} \cdot I + e^{\gamma(l+a)} \cdot I) \cdot e^{\gamma x} \\ & -\frac{r_p \cdot e^{\gamma l}}{2 \cdot \gamma \cdot (e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)} - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+2l)})} \cdot (-e^{-\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_b - e^{\gamma(l_{\text{ТП}}+l)} \cdot I_b \\ & - e^{-\gamma l} \cdot I_a - e^{\gamma l} \cdot I_a + e^{-\gamma(l+a)} \cdot I + e^{\gamma(l+a)} \cdot I) \cdot e^{-\gamma x}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где  $\gamma = \sqrt{r_p / r_{p3}}$  – коэффициент распространения рельсовой сети;

$l$  – расстояние от начала моделируемого участка до тяговой подстанции А и от тяговой подстанции Б до конца моделируемого участка, км;

$l_{ТП}$  – расстояние между тяговыми подстанциями А и Б, км;

$a$  – расстояние от тяговой подстанции А до электровоза, км;

$I_a$  – ток тяговой подстанции А, А;

$I_b$  – ток тяговой подстанции Б, А;

$I$  – ток электровоза, А.

С помощью формул (3.9)-(3.12) можно рассчитать распределение потенциала рельсовой сети при любой протяженности участка постоянного тока и при любых значениях параметров рельсовой сети, но только при условии, что на рассматриваемом участке находится один электровоз и обязательно между тяговыми подстанциями.

Численное же решение системы уравнений (3.1) представляется более эффективным, поскольку может быть найдено не только для любых параметров рельсовой сети и рассматриваемого участка, но и для любого числа нагрузок на рассматриваемом участке. Численное решение основано на методе конечных элементов и определяется с помощью программного комплекса *Comsol Multiphysics*. Собственно начальные условия для расчета как аналитического, так и численного те же, что и при экспериментальном исследовании.

При численном решении решается одномерная задача, поскольку рельсовая сеть может быть заменена прямой, на всей длине которой решается система (3.1). Одномерность задачи значительно ускоряет процесс расчета и получения результатов для любой протяженности участков и любого количества подстанций и электровозов. В местах расположения тяговых подстанций и электровоза задаются граничные условия по величине и направлению токов в этих точках. Условия сводятся к тому, что ток рельсовой сети в местах расположения подстанций равен току подстанции, взятому со знаком минус. В местах же расположения электровоза ток будет равен току электровоза взятому со знаком плюс. В результате вблизи

электровозов будет создаваться зона положительного потенциала, а вблизи подстанций – отрицательного. Кроме этого принимается условие, что на концах всего моделируемого участка железной дороги ток рельсов принимается равным нулю, т.е. полностью стекает в землю.

На рисунке 3.15-3.17 представлены графики потенциала рельсов для всех вариантов расположения нагрузок на рассматриваемом участке для варианта 1 параметров рельсовой сети.

Результаты, полученные при аналитическом и численном решении всех рассматриваемых вариантов расположения нагрузки на межподстанционной зоне и всех вариантов параметров рельсовой сети сошлись с экспериментальными результатами, полученными с помощью физической аналоговой модели, в пределах 10%. Таким образом, можно говорить об адекватности результатов численного моделирования при исследовании системы «рельс-земля».

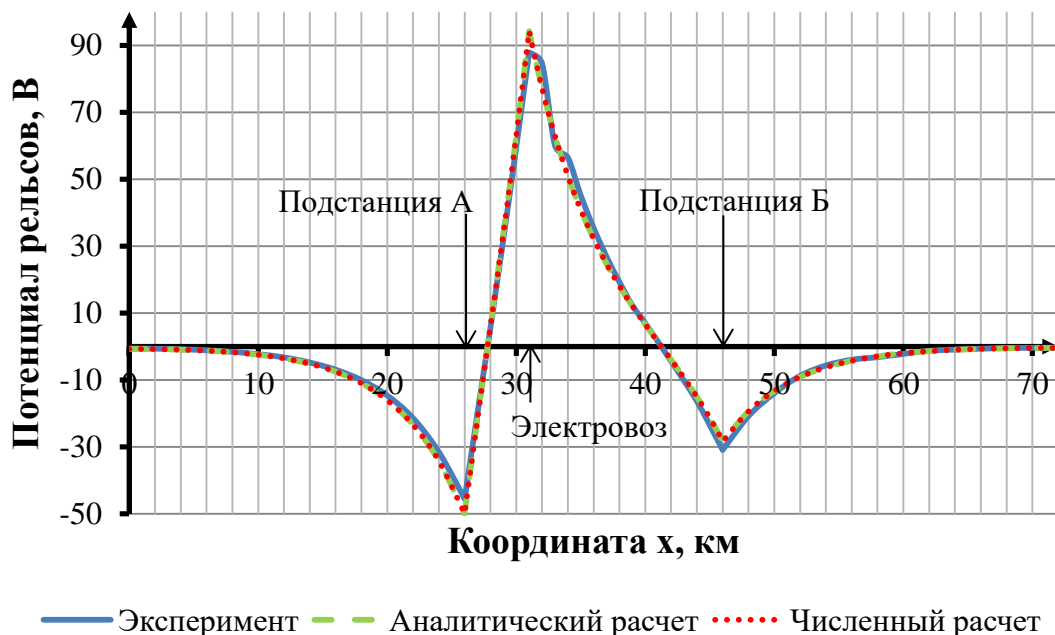


Рисунок 3.14 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом



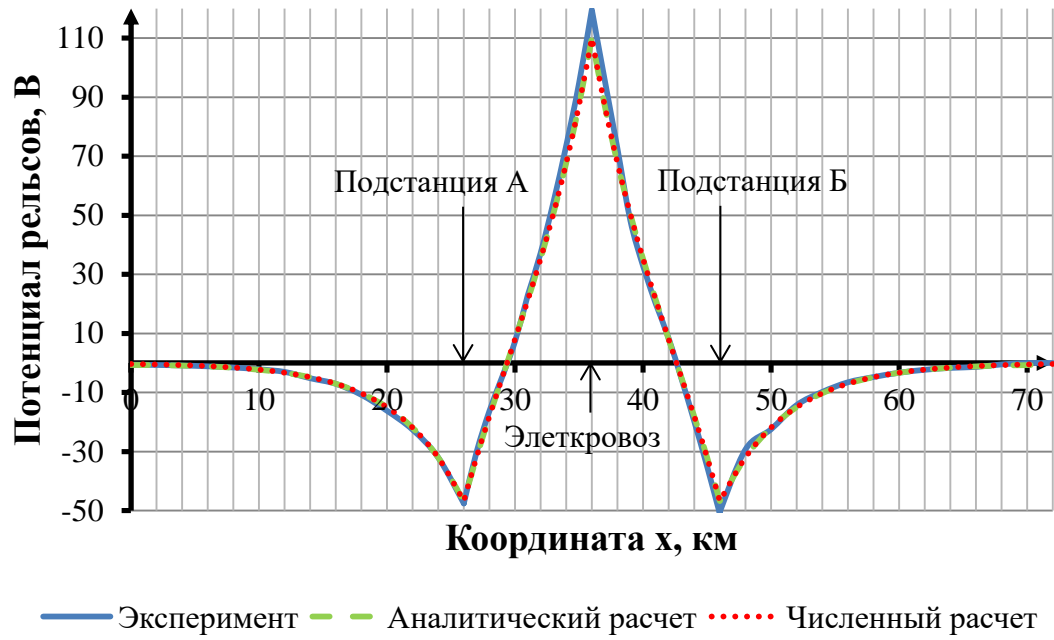


Рисунок 3.15 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

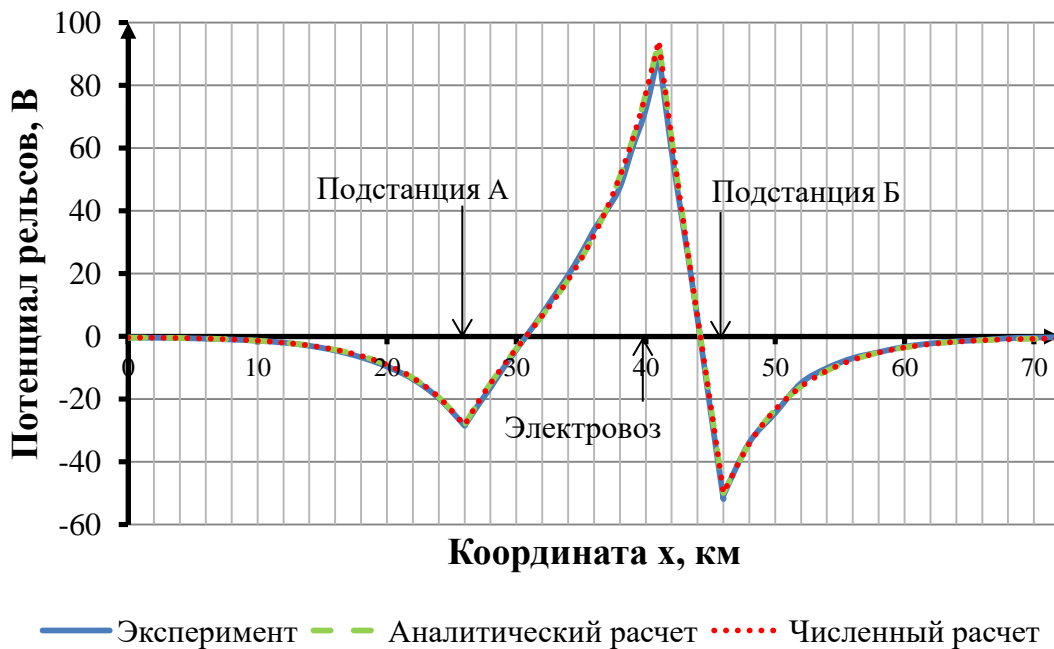


Рисунок 3.16 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

### 3.4.2 Система «рельсы-протяженный заземлитель»

Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» рассматривалась в главе 2. По аналогии с системой «рельс-земля» при нахождении аналитического решения необходимо рассматривать несколько участков в зависимости от количества подстанций и нагрузок на всем рассматриваемом участке железной дороги постоянного тока. В случае по рисунку 3.4 необходимо рассматривать 4 участка в рамках одной системы уравнений.

Общее решение системы дифференциальных уравнений для системы «рельсы-протяженный заземлитель» схоже с общим решением для системы «рельс-земля». Отличие заключается только в том, что в результате определяются две функции потенциала, постоянные интегрирования которых зависят от общих граничных условий, задаваемых в местах расположения тяговых подстанций и электровазов. Описание граничных условий дано в главе 2.

Возможен подход, заключающийся в использовании результатов измерений на физической аналоговой модели в дальнейших аналитических расчетах. Для получения всех необходимых исходных данных нужно экспериментальным путем определить значение потенциала заземлителя в месте расположения электроваза. Для исследования необходимо выполнить только один замер.

Кроме аналитического решения возможно получение решения численного, с помощью метода конечных элементов в программном комплексе *Comsol Multiphysics*, путем задания уравнений пользователя. При этом, нет необходимости в дополнительных исходных данных кроме параметров рельсовой сети и протяженного заземлителя, а также расположения подстанций, электровазов и величины их токов.

На рисунках 3.17-3.22 приведены графики потенциала рельсовой сети и заземлителя относительно удаленной земли для варианта 1 параметров рельсовой сети и заземлителя при различных вариантах расположения электроваза на межподстанционной зоне [123].

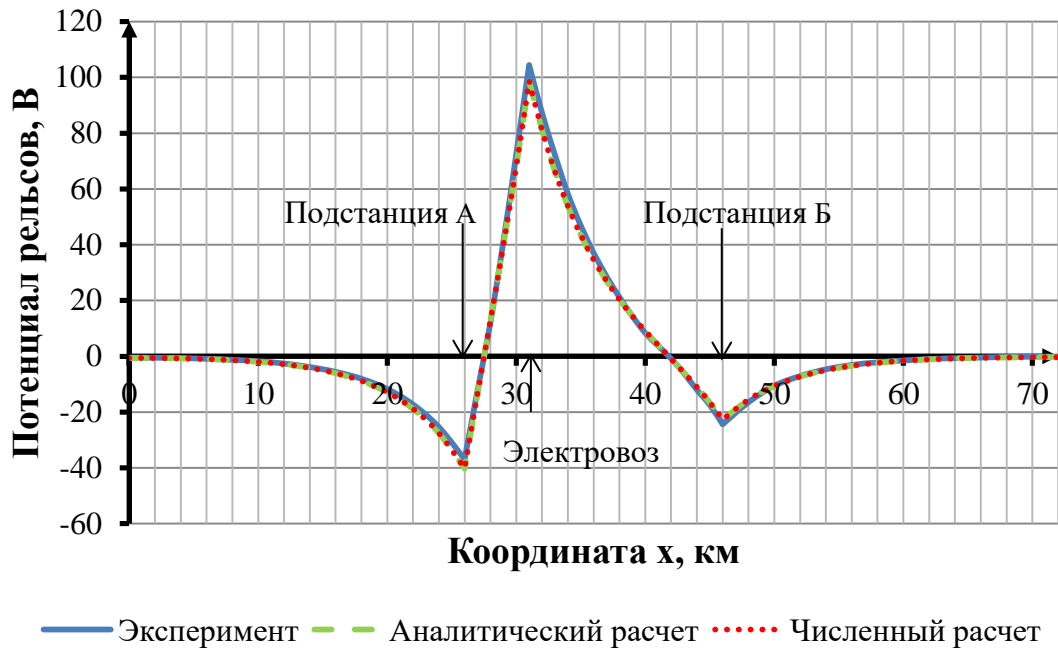


Рисунок 3.17 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

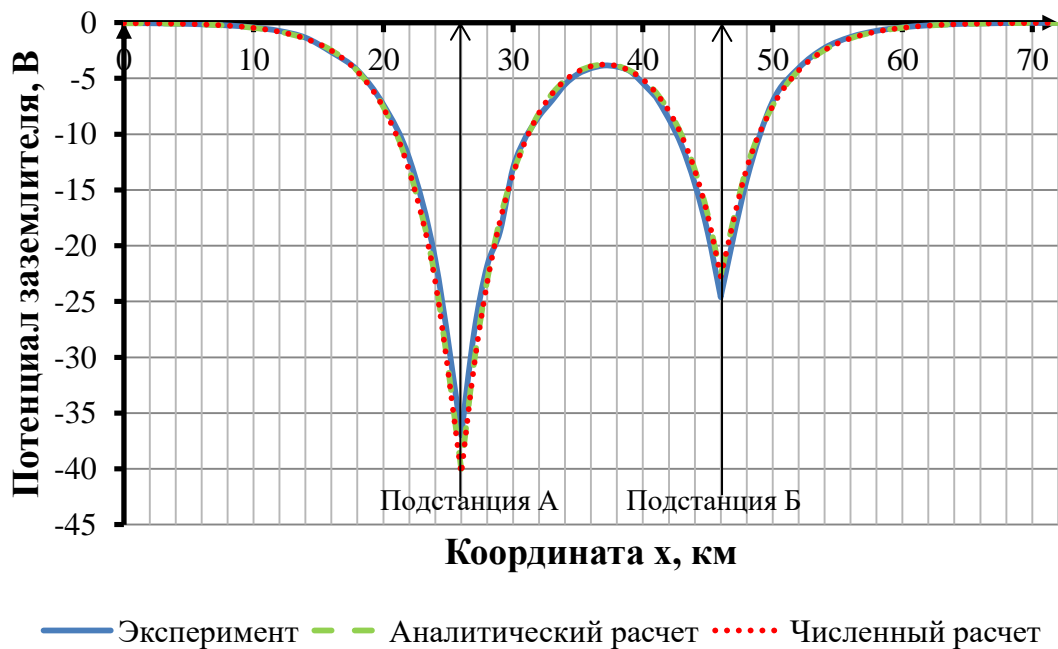


Рисунок 3.18 – Потенциал заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=5$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

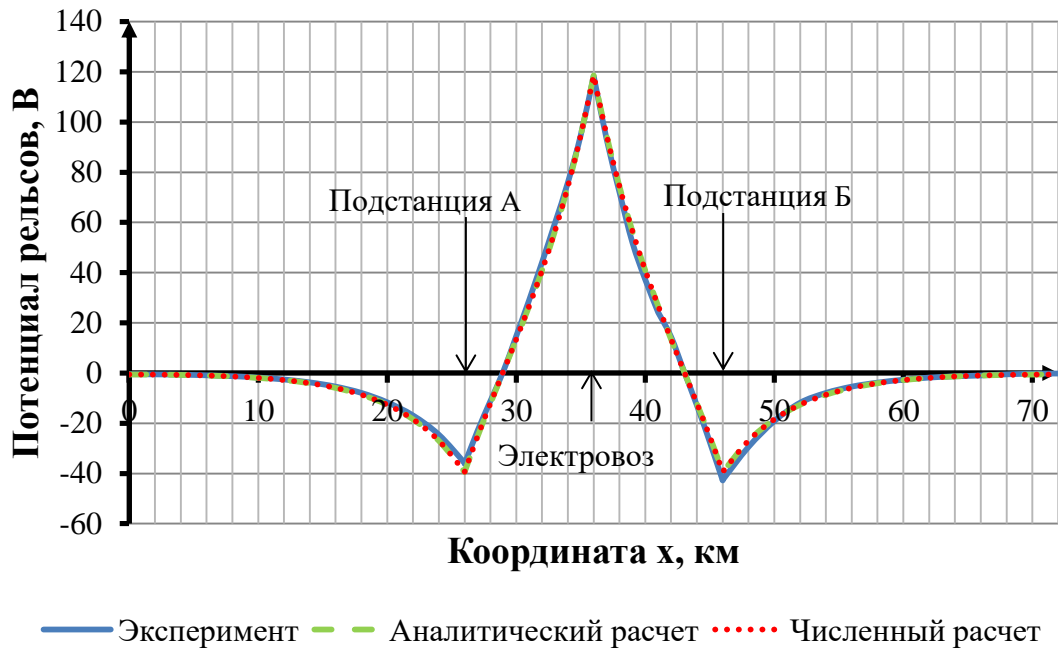


Рисунок 3.19 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

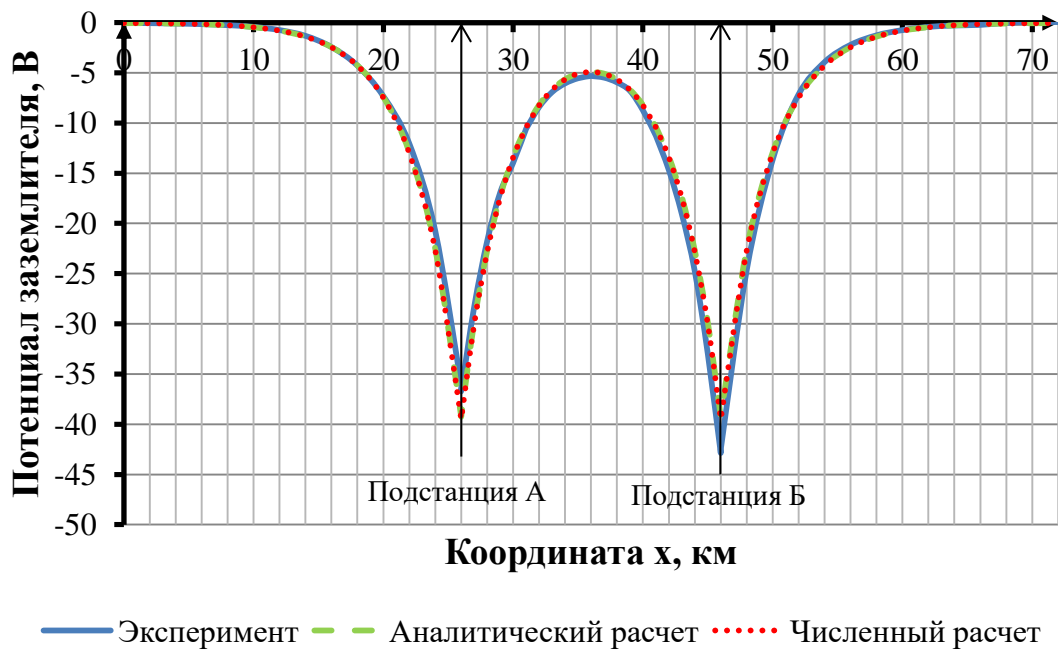


Рисунок 3.20 – Потенциал заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=10$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

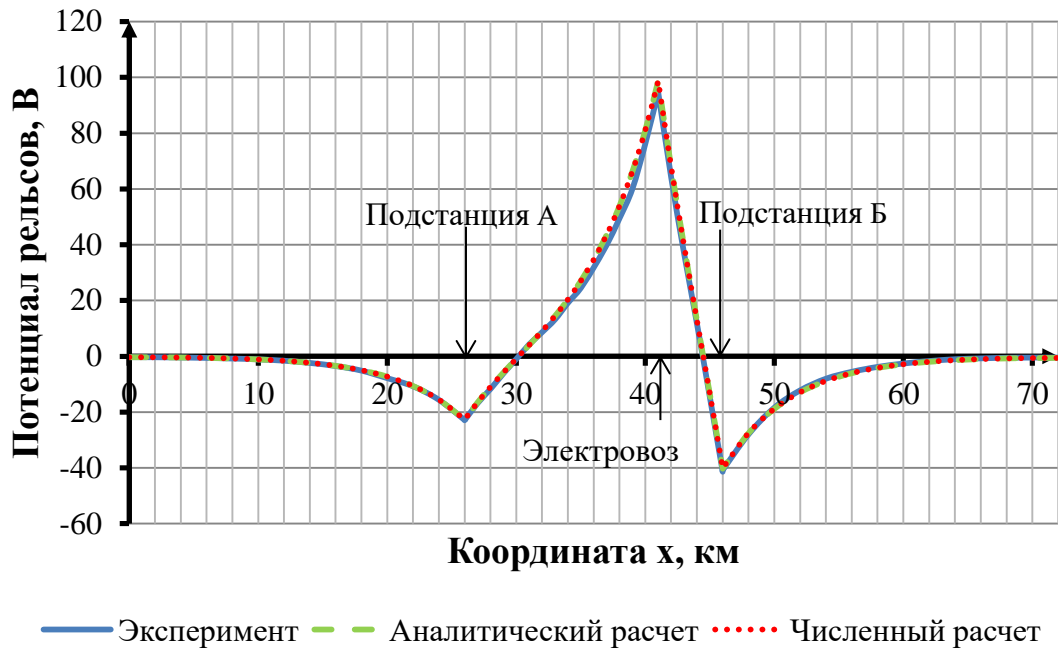


Рисунок 3.21 – Потенциал рельсов при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

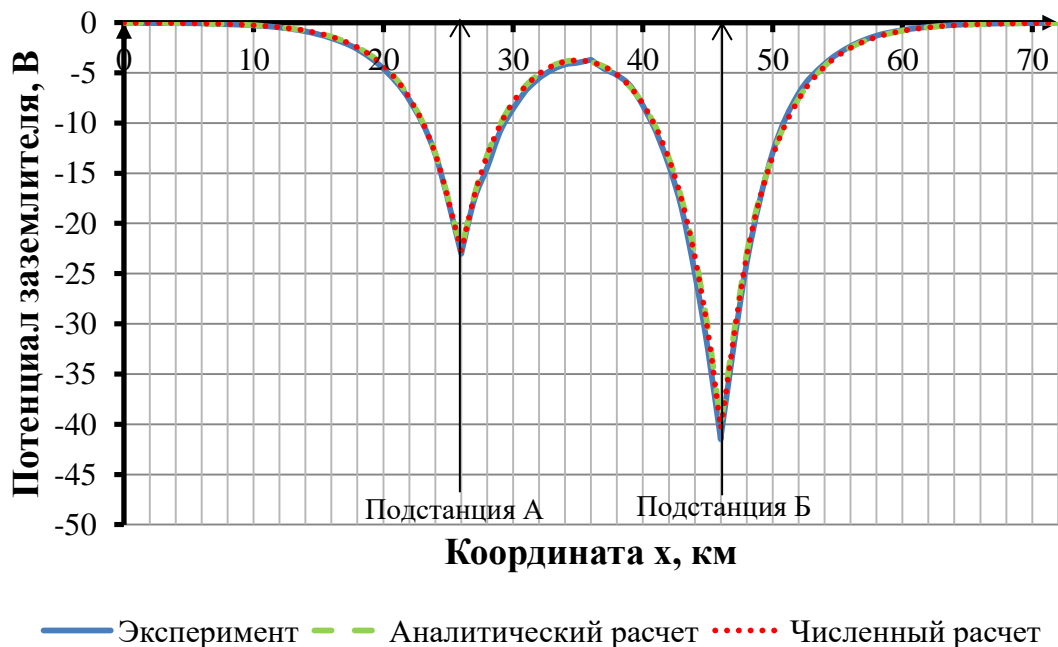


Рисунок 3.22 – Потенциал заземлителя при расположении электровоза на расстоянии  $a=15$  км от левой подстанции, полученный экспериментально, аналитическим и численным методом

Как видно из графиков, аналитическое и численное решения сошлись с экспериментальным в пределах 10%. Такая же сходимость результатов была получена и при втором варианте параметров рельсовой сети и протяженного заземлителя при всех вариантах расположения электровоза, что подтверждает адекватность математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель».

Исходя из полученных результатов, можно говорить о применимости и эффективности численного метода исследования распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» по сравнению с использованием физической аналоговой модели и аналитического метода исследования. В дальнейшем при оценке эффективности различных конструкций протяженных заземляющих устройств будет использоваться именно численный метод исследования, позволяющий учитывать при расчетах помимо описанных граничных условий также стекание тока через опоры контактной сети и отдельные вертикальные заземлители.

### **Выводы по третьей главе:**

1) Разработана физическая аналоговая модель, позволяющая экспериментально исследовать системы «рельсы–земля» и «рельсы–протяженный заземлитель».

2) С помощью положений теории подобия сформулированы критерии, подтверждающие подобность физической аналоговой модели и реального участка железной дороги постоянного тока.

3) В результате экспериментального исследования получены графики распределения потенциалов рельсовой сети и протяженного заземлителя в системе «рельсы-земля» и «рельсы-протяженный заземлитель» при различных продольных и переходных сопротивлениях рельсовой сети и протяженного заземлителя.

4) На основании математических моделей систем «рельсы-земля» и «рельсы-протяженный заземлитель» получены аналитические зависимости для тех же

значений продольных и переходных сопротивлений рельсовой сети и протяженного заземлителя, что и в экспериментальном исследовании.

5) С помощью метода конечных элементов было получено численное решение для тех же исходных данных, что и в экспериментальном исследовании.

6) Полученные экспериментальные, аналитические и численные результаты сошлись в пределах 10%, что говорит об эффективности всех рассмотренных методов исследования.

7) Исходя из полученных результатов, численный метод исследования системы «рельсы-протяженный заземлитель» при совместном использовании с экспериментальным методом может быть наиболее эффективен при дальнейшем исследовании.

## 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

### 4.1 Методика оценки эффективности

В тяговых сетях электрических железных дорог постоянного тока при заземлении опор контактной сети осуществляется совмещение заземляющего устройства в качестве защитного и рабочего. Назначение заземляющего устройства – защита от воздействия электрического тока на организм человека при прикосновении к частям электроустановок, нормально не находящихся под напряжением. В данной работе делается упор на оценку эффективности заземляющих устройств в качестве рабочих, то есть обеспечивающих эффективность эксплуатационных функций в нормальных и аварийных режимах. Специфика работы протяженного заземляющего устройства на участках постоянного тока связана с необходимостью защиты соединяемых с ним железобетонных конструкций от электрической коррозии, вызванной стеканием электрического тока в землю. Также применение протяженного заземляющего устройства не должно осложнять работу токовых защит в нормальном и аварийном режимах.

Учитывая вышесказанное можно сформулировать следующие критерии оценки эффективности конструктивного исполнения заземляющих устройств:

- 1) потенциальное уменьшение интенсивности электрической коррозии;
- 2) соответствие требованиям электробезопасности с точки зрения напряжения прикосновения в нормальном и аварийном режимах работы рассматриваемого участка;
- 3) работоспособность токовых защит фидеров тяговых подстанций при использовании протяженного заземляющего устройства;
- 4) технико-экономическое сравнение вариантов конструктивного исполнения.



Потенциальное уменьшение интенсивности электрической коррозии можно оценить по распределению потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель», используя теоретические положения главы 2. При соединении железобетонных конструкций с рельсами или с протяженным заземлителем величина тока, протекающего по ним, будет определяться величиной их потенциала в месте подключения, а также сопротивлением конструкции. Чем выше потенциал, тем большая величина тока протекает по конструкции. Кроме того, значение имеет направление протекания тока, которое определяется «знаком» потенциала: если потенциал положительный, то ток будет протекать из конструкции в землю, в противном случае – из земли в конструкцию. Именно при протекании тока из конструкции в землю происходит унос частиц металла и его дальнейшее разрушение. При изменении направления протекания тока процесс электрокоррозии подземных частей железобетонных конструкций происходить не будет. Как сказано выше, добиться изменения направления протекания тока можно путем снижения потенциала ниже уровня нуля. Этот процесс принято называть катодной поляризацией. Чем устойчивей катодная поляризация, тем надежней осуществляется защита сооружения. Устойчивость катодной поляризации можно оценить по соотношению участков положительного и отрицательного потенциала протяженного заземлителя: чем больше длина участка отрицательного потенциала и чем меньше его величина, тем устойчивей осуществляется поляризация.

Таким образом, знак и величина потенциала элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» являются показателями потенциального уменьшения интенсивности электрической коррозии соединенного с ними сооружения.

Соответствие требованиям электробезопасности в части значения напряжения прикосновения также определяется по распределению потенциалов в системе. Однако, напряжение прикосновения отличается от значения потенциала конструкции относительно удаленной земли, к которой человек прикасается. Собственно, указанный потенциал принято называть напряжением до прикосновения. Напряжение прикосновения напрямую зависит от сопротивления грунта, тела че-

ловека, и от того, как человек прикоснулся к находящейся под напряжением конструкции.

При оценке соответствия требованиям электробезопасности различных вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств необходимо определить величины напряжения прикосновения как к рельсовой сети, так и к протяженному заземлителю. В этом случае необходимо рассматривать различные варианты прикосновения в зависимости от доступности указанных элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель». Такая оценка сводится к сравнению полученных значений напряжения прикосновения с нормативными значениями. При этом возникает трудности, связанные с тем, что в нашей стране нет норм по величине напряжения прикосновения для железных дорог постоянного тока. Для промышленных электроустановок может быть применен ГОСТ 12.1.038 – 82(2001) «Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [124], в котором указаны соответствующие значения для производственных и бытовых электроустановок постоянного и переменного тока. В таблице 4.1 приведены значения, указанные в ГОСТ 12.1.038-82 (2001). В таблице указаны значения предельно допустимого напряжения прикосновения при продолжительности воздействия в пределах 1 секунды, при времени воздействия выше 1 секунды допустимым считается напряжение 40 В при постоянном токе. Учитывая специфику электрических железных дорог как электроустановки, некорректно использование норм для промышленных электроустановок.

Среди отечественных стандартов наиболее близким к электрифицированным железным дорогам можно считать стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 12.003-2011 «Требования к техническому обслуживанию и ремонту тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения» [125]. В таблице 4.2 приведены значения напряжений прикосновения на территории электроустановки при различном времени воздействия, в соответствии с указанным стандартом.

Таблица 4.1 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме производственных электроустановок в соответствии с ГОСТ 12.1.038 – 82(2001)

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока $t$ , с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св.1,0
Переменный 50 Гц	$U$ , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	$I$ , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный 400 Гц	$U$ , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	$I$ , мА												8
Постоянный	$U$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	$I$ , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

Таблица 4.2 – Норма наибольшего значения напряжения прикосновения на территории электроустановки и напряжения на заземляющем устройстве в зависимости от длительности воздействия в соответствии с СТО РЖД 12.003-2011

Длительность воздействия, с	Норма наибольшего значения напряжения, В	Длительность воздействия, с	Норма наибольшего значения напряжения, В
0,1	500	0,7	130
0,2	400	1,0	100
0,5	200	свыше 1,0 до 5,0	65

Однако, в этом стандарте не конкретизировано справедливы ли указанные значения для электроустановок постоянного тока, что затрудняет его использование.

В этой ситуации наиболее корректным будет использование стандарта [88-91], в котором представлены рекомендованные значения напряжения прикосновения для электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Допустимые напряжения прикосновения при различной продолжительности воздействия в соответствии со стандартом EN 50122-1, В

Продолжительное воздействие			Кратковременное воздействие		
Продолжительность воздействия, с	Электрифицированные железные дороги переменного тока	Электрифицированные железные дороги постоянного тока	Продолжительность воздействия, с	Электрифицированные железные дороги переменного тока	Электрифицированные железные дороги постоянного тока
продолжительно	60	120	< 0,7	155	350
300	65	150	0,6	180	360
1	75	160	0,5	220	385
0,9	80	165	0,4	295	420
0,8	85	170	0,3	480	460
0,7	90	175	0,2	645	520
			0,1	785	625
			0,05	835	735
			0,02	865	870

В таблице 4.3 приведены конкретные значения для продолжительного и кратковременного воздействия. Соответственно, в нормальном режиме работы необходимо ориентироваться на величину напряжения прикосновения в 120 В, которая соответствует времени воздействия более 300 с. В аварийном режиме необходимо учитывать время воздействия, поскольку этот режим характеризуется большими значениями токов. Для быстродействующих выключателей фидеров контактной сети постоянного тока полное время отключения может быть принято равным 0,08 с, исходя из чего допустимым напряжением прикосновения в аварийном режиме будет напряжение 669 В. Таким образом, распределения потенциалов в нормальном и аварийном режимах будет сравниваться с указанными выше значениями, при этом если напряжение до прикосновения будет меньше, чем допустимое напряжение прикосновения, то необходимости в дополнительных расчетах, с учетом сопротивления тела человека, нет.

С точки зрения работоспособности токовых защит фидеров тяговых подстанций, основной проблемой является значительная величина сопротивления протяженного заземлителя по сравнению с сопротивлением рельсовой сети. При

нормальном режиме работы участка постоянного тока наличие протяженного заземлителя будет слабо влиять на величину токов фидеров. Аналогичная ситуация будет и при коротком замыкании контактной сети на рельсовую сеть. При коротком замыкании на протяженный заземлитель величина тока замыкания будет сильно ограничена сопротивлением заземлителя, что может привести к несрабатыванию быстродействующих выключателей фидеров и повреждению оборудования. Для решения этой проблемы возможно два подхода:

- снизить сопротивление заземлителя путем повышения площади поперечного сечения;
- совершенствование конструкции всего заземляющего устройства.

Очевидно, что экономически нецелесообразно использовать в качестве заземлителя металлический профиль аналогичного с рельсами сечения, поэтому для обеспечения работоспособности защит необходимо вносить в конструкцию заземляющего устройства дополнительные элементы, основным назначением которых будет компенсация влияния заземлителя на работу защит.

Решением проблемы снижения тока при коротком замыкании на протяженный заземлитель является обеспечение срабатывания защит в этом режиме при имеющихся значениях токов короткого замыкания. В этом случае необходимо контролировать величину тока протекающего именно по протяженному заземлителю с помощью измерительных устройств. Местом подключения этих устройств является провод, подключающий протяженный заземлитель к «-» шине тяговой подстанции.

Развитие цифровых систем защиты и автоматики позволяет подключать к блоку управления быстродействующим выключателем дополнительные измерительные устройства, сигнал с которых будет приводит к отключению выключателя.

Таким образом, необходимо составить такие требования для уставки токовых защит, которые обеспечили бы отключение аварийных режимов, а также исключали ложные срабатывания в нормальном режиме. Для этого необходимо получить зависимость тока фидера контактной сети и тока протяженного заземлите-

ля в местах расположения тяговых подстанций в нормальном режиме от времени, что позволит определить допустимые токи. Для оценки величин токов в режиме короткого замыкания необходимо рассмотреть зависимость указанных выше токов от координаты места короткого замыкания, с помощью которых можно будет сделать вывод о чувствительности работы токовых защит.

Оценку экономической эффективности рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения можно осуществить путем сравнения приведенных затрат за 10 лет эксплуатации, включающих капитальные и эксплуатационные затраты. Наиболее эффективным будет считаться вариант с минимальными приведенными расходами.

По результатам оценки вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств по всем четырем критериям будет сделан вывод об эффективности того или иного варианта.

#### **4.2 Оценка вариантов конструктивного исполнения по критерию потенциального уменьшения интенсивности электрокоррозии**

В качестве расчетного участка для исследования как аварийного, так и нормального режимов был выбран двухпутный участок «Сарга» – «Сабик» Свердловской железной дороги. На сегодняшний день на этом участке в нечетном направлении осуществляется тяжеловесное движение с пропуском поездом массой до 9000 тонн.

При исследовании нормального режима работы будет рассматриваться движение пакетов поездов в четном и нечетном направлении с межпоездным интервалом 10 минут. В четном направлении будет двигаться пакет из 3х поездов: 3000 т, 5000т, 3000 т. В нечетном направлении также будет двигаться пакет из 3х поездов: 6000 т, 9000 т, 6000 т. При этом, пакет в нечетном направлении начинает

движение только после завершения движения пакета по четному пути. На сегодняшний день тяжеловесное движение реализуется путем ведения пакетов поездов, исходя из чего для нормального режима была выбрана реальная конфигурация пакетов.

Участок «Сарга»–«Сабик» имеет сложный профиль, при этом уклоны достигают 7-8 %, исходя из чего при движении электровозов по этому участку в обоих направлениях происходит большое потребление тока, особенно при ведении тяжеловесных поездов.

На этом участке в обоих направлениях применяется контактная подвеска М-95+2МФ-100+2А-185, сопротивление которой равно 0,0369 Ом/км. Рельсовая сеть выполнена рельсами Р-65, сопротивление рельсовой сети равно 0,0076 Ом/км. Схема соединения подвесок – параллельная, с применением 4 пунктов параллельного соединения и одного поста секционирования. На обеих подстанциях в качестве питающих фидеров используются провода марки 5А-185. На подстанции «Сарга» длина питающего фидера нечетного пути – 0,9 м., его сопротивление – 0,0288 Ом, длина фидера четного пути – 1 м, его сопротивление 0,032 Ом. На подстанции «Сабик» длина питающего фидера нечетного пути – 0,07 м, его сопротивление – 0,0022 Ом, длина фидера четного пути – 0,06 м, его сопротивление – 0,0019 Ом. Отсасывающий провод на обеих подстанциях имеет марку 12А-185. Длина отсоса на подстанции «Сарга» – 0,1 м, его сопротивление – 0,0016 Ом. На подстанции «Сабик» длина отсоса – 0,27 м, его сопротивление – 0,0036 Ом.

Тяговые подстанции «Сарга» и «Сабик» оборудованы двумя преобразовательными трансформаторами ТРДП-16000/10 каждая. В качестве головных трансформаторах на этих подстанциях применяются ТДТНГ-16000/110. Приведенные сопротивления подстанций равны: «Сарга» – 0,045 Ом, «Сабик» – 0,047 Ом. Напряжение холостого хода на обеих подстанциях равно 3500 В.

Помимо параметров участка и тяговых подстанций важными исходными данными являются результаты тяговых расчетов для поездов указанной массы, проходящих по расчетному участку. В данном случае необходимы зависимости потребляемого электровозом тока и его координаты на участке от времени. Про-

ход рассматриваемых пакетов поездов по участку «Сарга»-«Сабик» занимает 76,75 мин., при условии, что начальная скорость поездов равна 60 км/ч.

В качестве исходных данных также будут использованы результаты моделирования поперечного сечения пути, которые приведены в приложении А.

Первым критерием эффективности варианта конструктивного исполнения является потенциальное уменьшение интенсивности электрокоррозии, о котором можно судить по распределению потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель». Далее приведены соответствующие графики для нормального режима работы для нескольких моментов времени: 3, 13,5, 39, 49,5 и 60 мин. За нулевой момент времени принимается начало движения первого поезда из пакета четного пути. Эти моменты времени выбирались исходя из токов, потребляемых электровозами. Соответственно в момент времени 3 мин. по четному пути движется поезд массой 3000 т с током 2732 А, в момент времени 13,5 мин. по четному пути движутся два поезда массой 5000 т и 3000 т с токами 2732 А и 50 А. В момент 39 мин. по нечетному пути движется поезд массой 6000 т с током 2989 А, в момент 49,5 мин. – поезда массой 6000 т и 9000 т с токами 1797 А и 4097 А, в момент 60 мин. – поезда массой 6000 т, 9000 т и 6000 т с токами 2400 А, 4097 А и 3402 А. Видно, что в каждом следующем моменте времени токовая загруженность участка возрастает.

Для наглядности на графиках потенциалы каждого из элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» двухпутного участка будут представлены для всех указанных выше моментов времени.

На рисунках 4.1-4.4 приведены распределения потенциалов рельсовой сети и заземлителя для варианта с применением горизонтального заземляющего электрода. Для остальных вариантов графики приведены в приложении Б.

По рисункам 4.1, 4.2 можно проследить положение поездов на каждом из путей в указанные моменты времени по пикам потенциалов. Также видно, что в среднем практически вся межподстанционная зона охватывается положительным потенциалом рельсовой сети по обоим путям. В случае подключения опор непосредственно к рельсам в этом случае будет происходить их электрокоррозия.



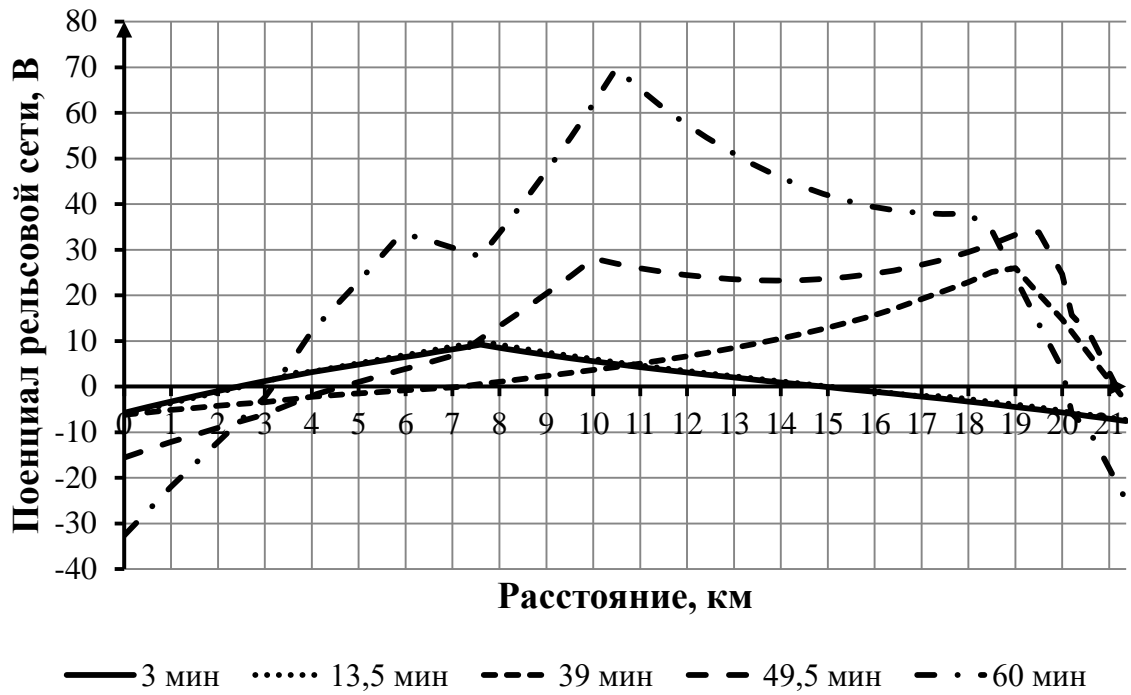


Рисунок 4.1 – Распределение потенциалов рельсов нечетного пути вдоль рассматриваемого участка

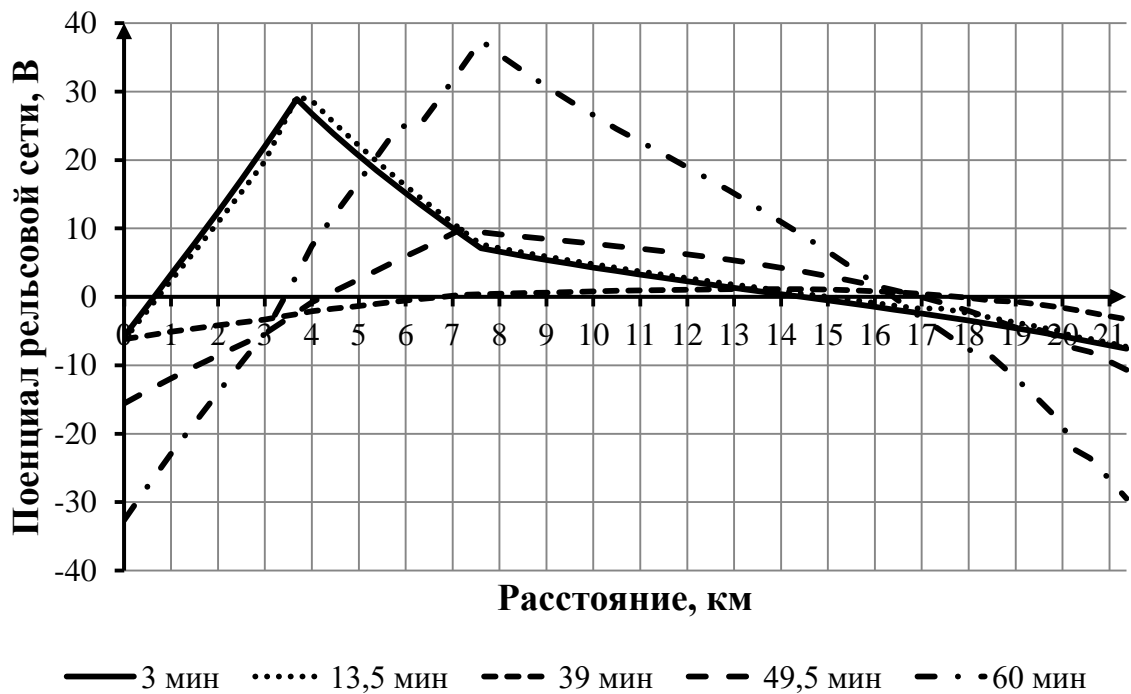


Рисунок 4.2 – Распределение потенциалов рельсов четного пути вдоль рассматриваемого участка

На рисунках 4.3, 4.4 видно, что потенциал заземлителя ниже, чем потенциал рельсовой сети соответствующего пути, но присутствуют зоны положительного потенциала. Протяженность этих зон составляет 65-75% от длины межподстанционной зоны. Соответственно в этих зонах также будет происходить электрокоррозия соединенных с ним опор, а также электрокоррозия самого заземлителя. Стоит отметить, что скорость коррозии опор в этом случае будет меньше, чем при подключении их к рельсам, но она все равно будет происходить.

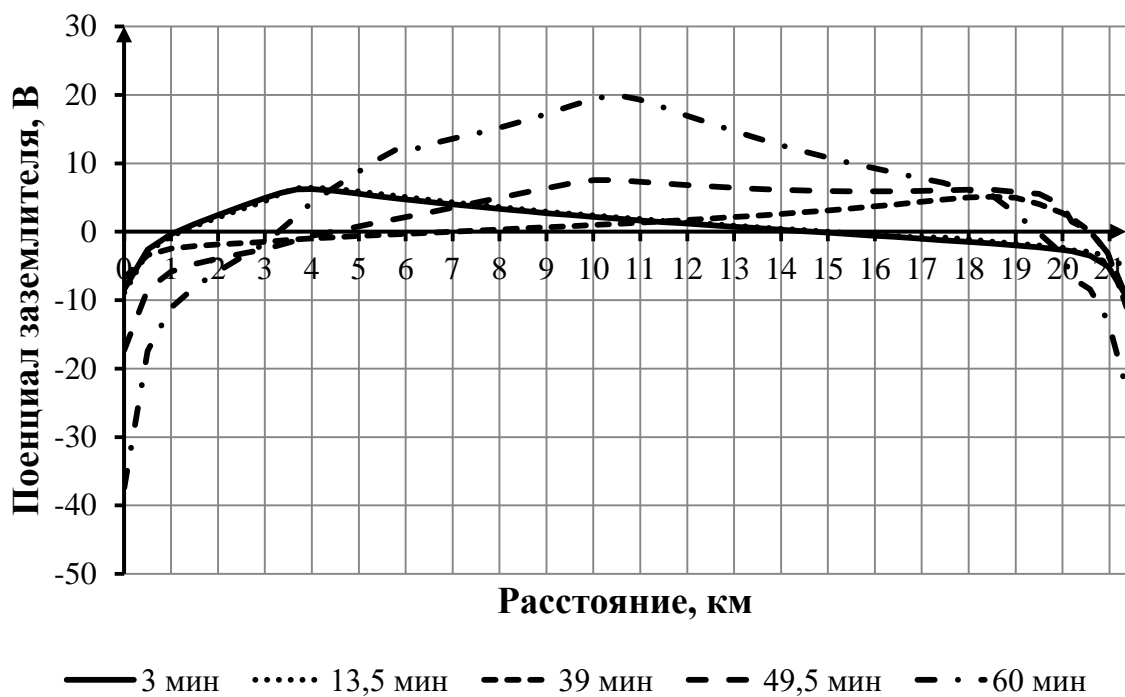


Рисунок 4.3 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути вдоль рассматриваемого участка

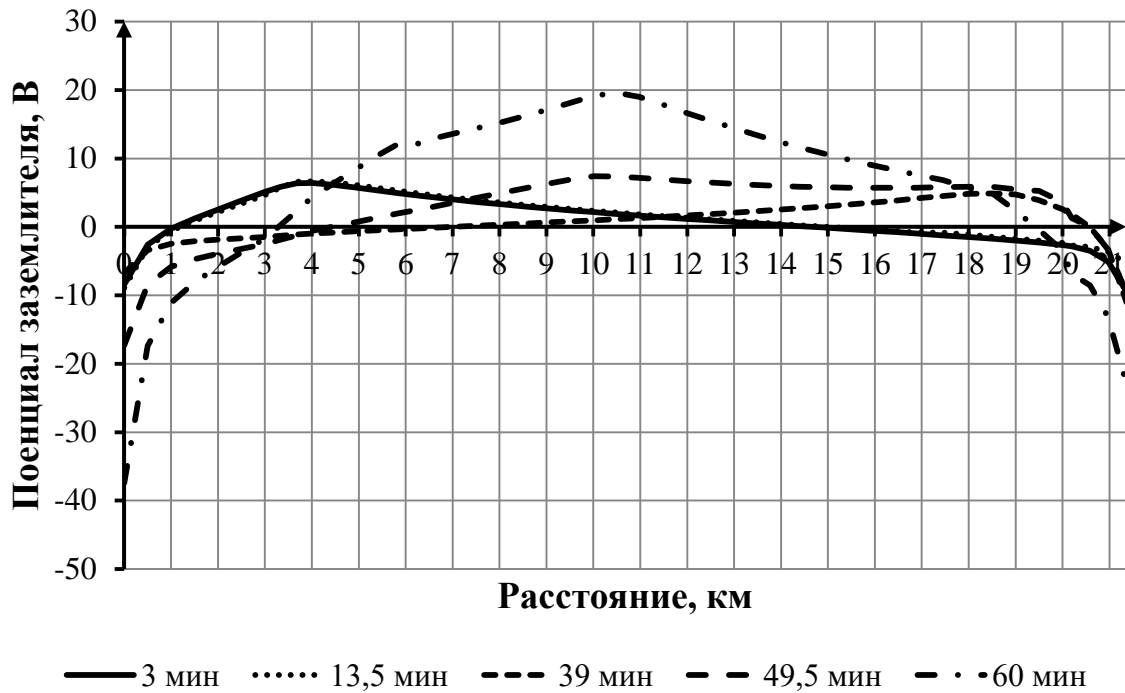


Рисунок 4.4 – Распределение потенциалов заземлителя четного пути вдоль рассматриваемого участка

Можно сделать вывод о том, что при использовании горизонтального заземляющего электрода катодная поляризация соединенных с ним опор контактной сети в нормальном режиме неустойчива.

Аналогичные распределения потенциалов в режиме глухого короткого замыкания на рельс контактной подвески нечетного пути приведены на рисунках 4.5-4.8. Для остальных вариантов конструктивного исполнения графики приведены в приложении В.

Из рисунка 4.5 легко определить координаты точек короткого замыкания по пикам потенциала. Соответственно, при смещении точки короткого замыкания смещается и пик потенциала рельсовой сети. Кроме этого видно, что пики потенциала в режиме короткого замыкания на рельсовую сеть больше аналогичных значений в нормальном режиме в 4-5 раз.

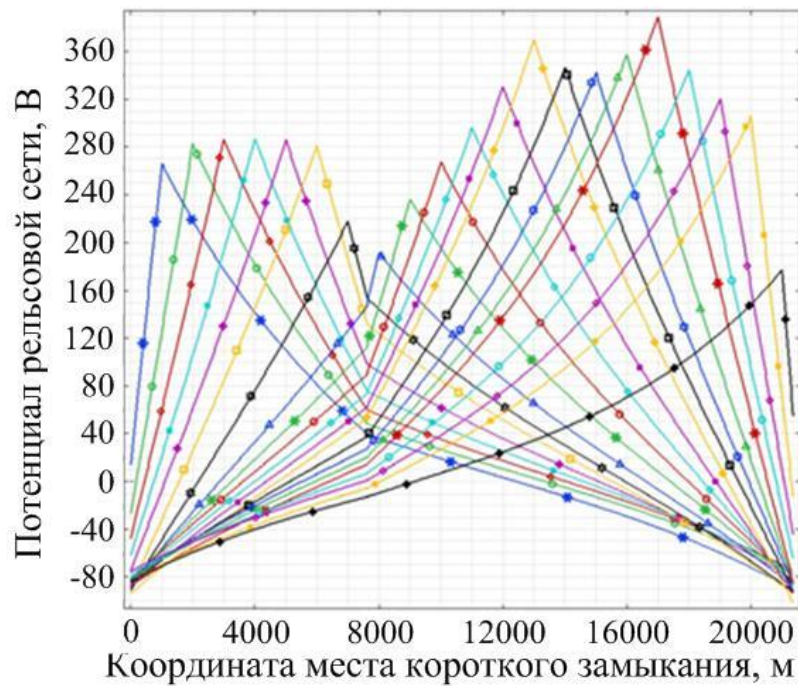


Рисунок 4.5 – Распределение потенциалов рельсовой сети нечетного пути в зависимости от места короткого замыкания

Из рисунка 4.6 видно, что потенциал смежного пути при коротком замыкании на рельсовую сеть нечетного пути также достигает больших значений, которые больше аналогичных значений в нормальном режиме в несколько раз. В отличие от рисунка 4.5 в этом случае место короткого замыкания по пикам потенциала определить нельзя, поскольку в четный путь ток сосредоточено втекает только в месте расположения междупутного соединителя. Соответственно, пик потенциала всегда располагается в этом месте и чем ближе место замыкания к междупутному соединителю, тем он больше.

Из рисунков 4.7, 4.8 видно, что, как и в нормальном режиме, в режиме замыкания на рельсовую сеть потенциал заземлителя имеет положительные значения вблизи места замыкания. При этом зона положительного потенциала составляет 56-58% длины межподстанционной зоны при близких замыканиях и 65-68% при удаленных, что говорит об отсутствии устойчивой катодной поляризации опор контактной сети при возникновении короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть.

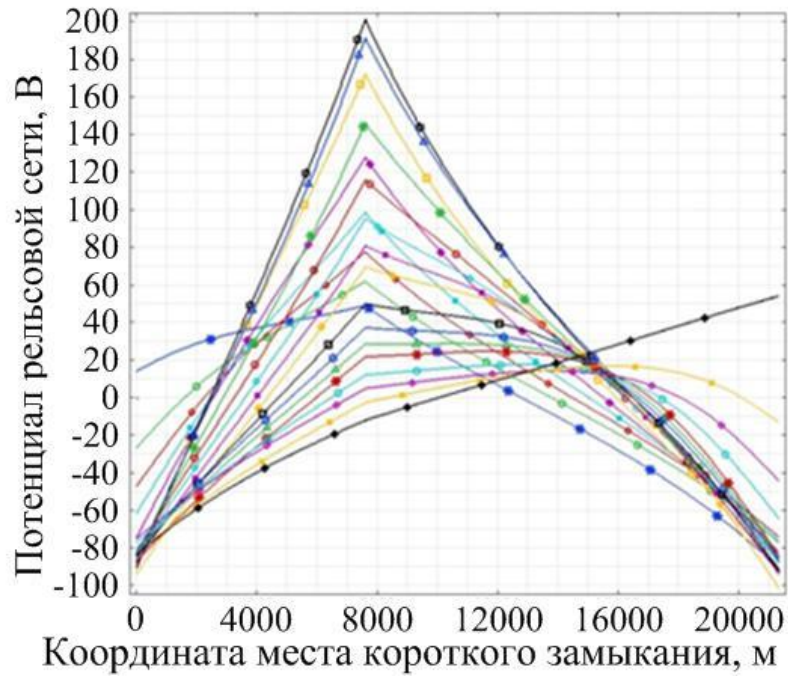


Рисунок 4.6 – Распределение потенциалов рельсовой сети четного пути в зависимости от места короткого замыкания

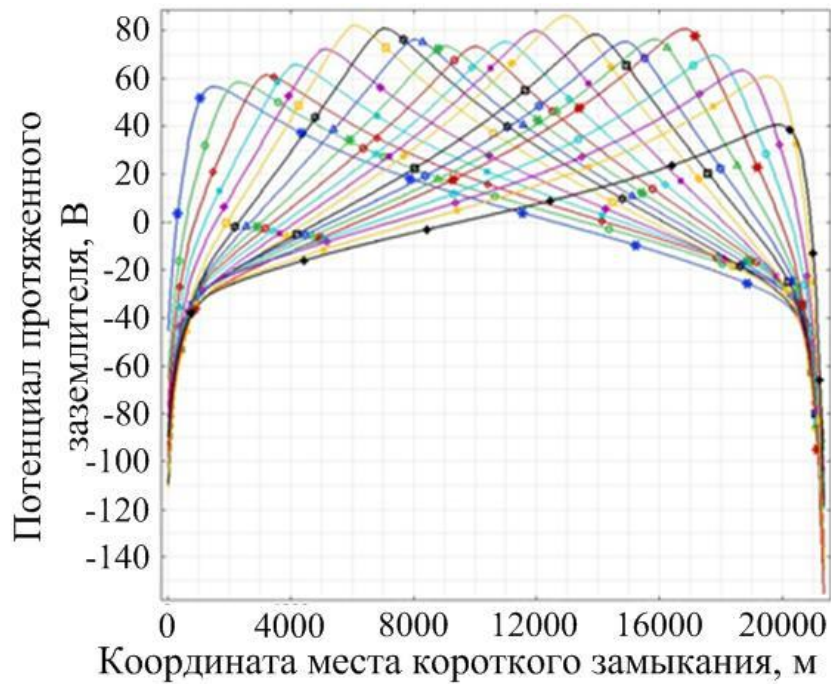


Рисунок 4.7 – Распределение потенциалов протяженного заземлителя нечетного пути в зависимости от места короткого замыкания

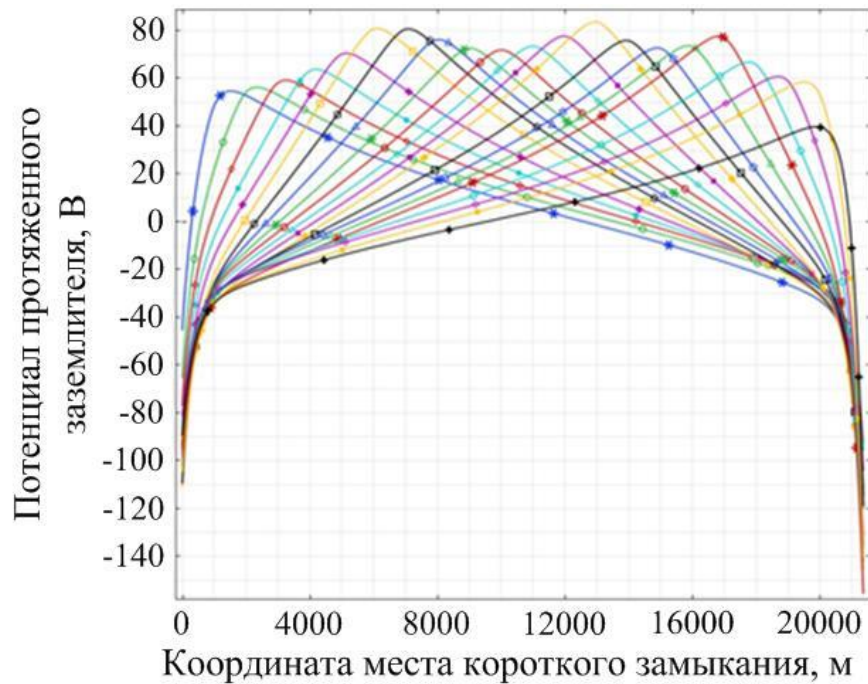


Рисунок 4.8 – Распределение потенциалов протяженного заземлителя четного пути в зависимости от места короткого замыкания

Полученные выводы будут справедливы также и для случая короткого замыкания контактной сети четного пути на рельсы четного пути. Отличие будет заключаться только в том, что в этом случае пиковые значения будет иметь потенциал четного пути. Исходя из этого, далее этот случай не рассматривается.

После нормального режима и режима замыкания контактной сети на рельсовую сеть необходимо рассмотреть режим замыкания контактной сети на заземлитель. При использовании подземного заземлителя глухое короткое замыкание маловероятно, в отличие от варианта с перекрытием изоляции. В этом случае величина тока короткого замыкания, а следовательно и потенциала, будет определяться сопротивлением в месте замыкания. Снижение сопротивления будет приводить к росту тока и потенциала и наоборот. Исходя из этого в режиме короткого замыкания на заземлитель рассматривались несколько значений сопротивления перекрытой изоляции: 300 МОм, 1МОм, 1000Ом, 100 Ом. На рисунке 4.9 представлено распределение потенциалов заземлителя четного пути при замыкании на него контактной сети на расстоянии 10 км от подстанции «Сарга».

Из рисунка 4.9 видно, что при сопротивлении более 1000 Ом потенциал за-

землителя в месте замыкания менее 0,5 В, при этом при сопротивлении 100 Ом потенциал достигает значения 5,5 В. Дальнейшее снижение сопротивления в цепи замыкания можно рассматривать как непосредственное соединение контактной сети и заземлителя, что маловероятно. Исходя из этого, далее будут представлены графики распределения потенциалов для сопротивления в цепи замыкания равно-го 100 Ом.

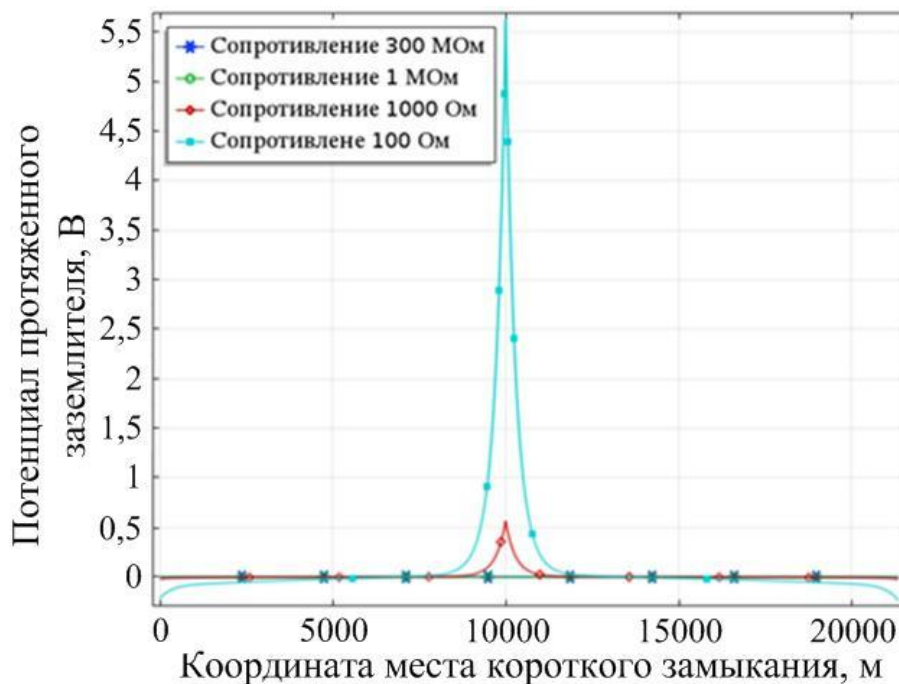


Рисунок 4.9 – Распределение потенциалов протяженного заземлителя зависимости от сопротивлении в цепи замыкания

По аналогии с предыдущим режимом, в режиме короткого замыкания на заземлитель будет рассматриваться только случай замыкания контактной сети нечетного пути на заземлитель нечетного пути.

На рисунке 4.10 представлено распределение потенциалов заземлителя нечетного пути в зависимости от места замыкания контактной сети нечетного пути на заземлитель нечетного пути.



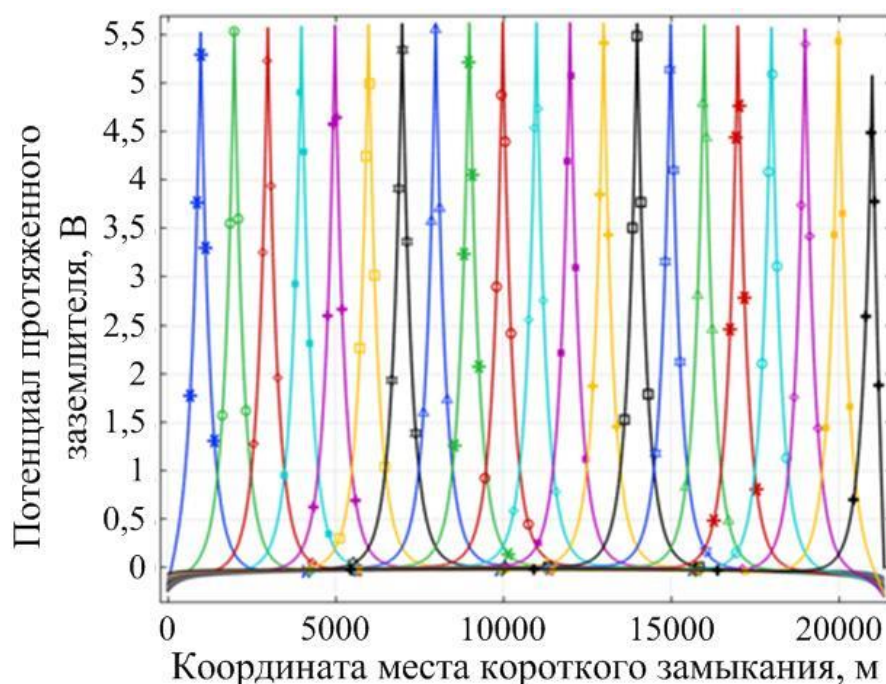


Рисунок 4.10 – Распределение потенциала заземлителя нечетного пути в зависимости от места замыкания контактной сети нечетного пути на заземлитель нечетного пути

По графикам можно проследить места замыканий, в которых наблюдаются пики потенциалов. Соответственно, пики потенциала варьируются в пределах 5-5,6 В, что в разы ниже, чем в режиме замыкания контактной сети на рельсовую сеть и даже ниже аналогичных значений в нормальном режиме. Также видно, что вблизи места замыкания образуется зона положительного потенциала, однако, протяженность этой зоны составляет 15-16% от длины межподстанционной зоны, что в разы меньше аналогичных показателей для нормального режима и режима замыкания на рельс.

На рисунке 4.11 представлено распределение потенциалов четного пути. По аналогии с нормальным режимом и режимом замыкания на рельсовую сеть потенциал четного пути также имеет пиковые значения, по которым можно определить место короткого замыкания. Пики варьируются от 0,8 В до 1,2 В. Вблизи пиков также наблюдаются зоны положительного потенциала заземлителя, ширина которых также составляет 15-16% от длины межподстанционной зоны.

Потенциал рельсовой сети четного и нечетного пути практически равен ну-



лю, поскольку в них не происходит сосредоточенного втекания тока.

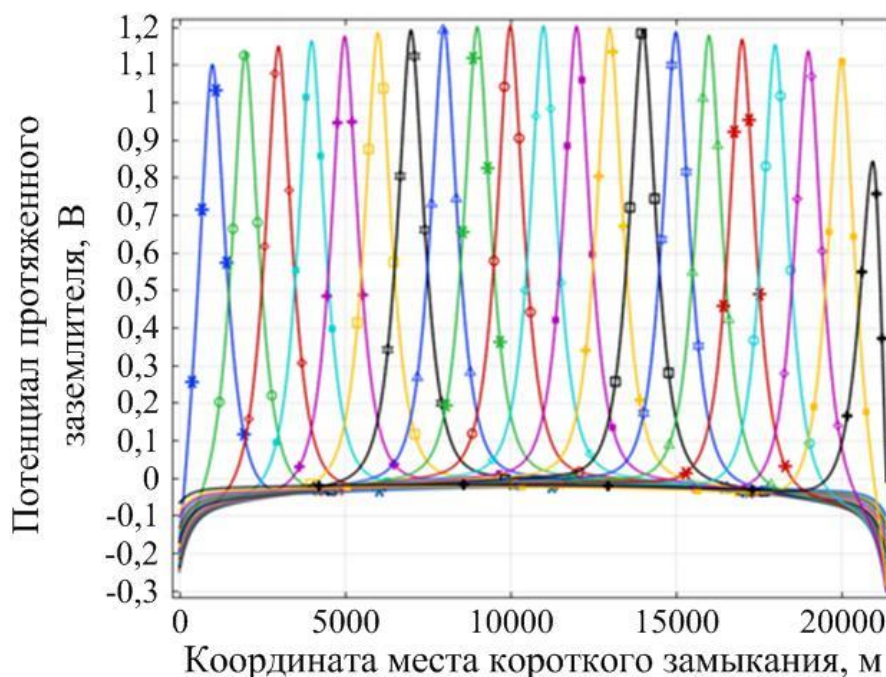


Рисунок 4.11 – Распределение потенциала заземлителя четного пути в зависимости от места замыкания контактной сети нечетного пути на заземлитель нечетного пути

Таким образом, режим замыкания на рельс для рассматриваемого варианта конструктивного исполнения является лучшим, поскольку пики потенциалов заземлителя и зоны положительного потенциала обоих путей минимальны. Однако устойчивая поляризация при использовании заземлителя, расположенного под землей, ни в одном рассмотренном режиме не наблюдалось.

Далее будет произведена оценка по критерию устойчивости катодной поляризации для варианта конструктивного исполнения с применением комбинированного заземлителя.

На рисунках Б.1-Б.4 приведены распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» для нормального режима работы участка при пропуске пакетов поездов в четном и нечетном направлении. В этом случае рассматриваются те же моменты времени.

По рисункам Б.1, Б.2 видно, что при использовании комбинированного за-

землителя произошло увеличение потенциала рельсов обоих путей в нормальном режиме по сравнению с предыдущим вариантом. Пиковые значения потенциалов возросли с 70 В до 90-95 В по нечетному пути и с 30-40 В до 80 В по четному пути. Это вызвано увеличением переходного сопротивления рельсовой сети обоих путей, поскольку при использовании комбинированного заземлителя отсутствует распределенная связь между рельсовой сетью и заземлителем. При этом положение поездов на рассматриваемом участке также можно определить по пикам потенциала обоих путей.

Из рисунков Б.3, Б.4 видно, что распределение потенциала заземлителей обоих путей отличается от аналогичных распределений по рисункам 4.3, 4.4. Главным отличием является отсутствие зон положительного потенциала, в которых возможна электрическая коррозия опор, соединенных с протяженным заземлителем. При этом наблюдается повышение потенциала заземлителя в середине межподстанционной зоны, которое связано с наличием связи между заземлителем и землей через сопротивление растеканию вертикальных электродов и сопротивление опор. Максимальное значение потенциала варьируется от -4 до -17 В. Чем меньше будут указанные сопротивления, тем сильнее будет увеличиваться потенциал заземлителя. Увеличение токовой нагрузки на участке приводит к снижению потенциала заземлителя и к повышению устойчивости катодной поляризации. Таким образом, по критерию устойчивости катодной поляризации комбинированный заземлитель превосходит подземный в нормальном режиме.

Далее будут рассмотрены режимы короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути и аналогичный режим при замыкании на заземлитель нечетного пути.

На рисунках В.1, В.2 представлено распределение потенциалов рельсов нечетного и четного пути при глухом коротком замыкании контактной сети.

Как и в нормальном режиме, в режиме замыкания на рельсы наблюдается увеличение максимальных значений потенциалов рельсов обоих путей по сравнению с вариантом с использованием подземного заземлителя. Максимальные значения возросли с 180-390 В до 200-460 В по нечетному пути и с 200 В до 250 В

для четного пути.

Распределение потенциала заземлителей нечетного и четного путей для режима замыкания контактной сети на рельс на нечетном пути представлено на рисунках В.3, В.4.

По аналогии с нормальным режимом потенциал заземлителей обоих путей в рассматриваемом режиме не имеет зон положительного потенциала даже при замыканиях вблизи тяговых подстанций. Очевидным является значительное снижение потенциала по сравнению с нормальным режимом. При этом потенциал заземлителя не повышается выше  $-25$  В, а в середине межподстанционной зоны значение потенциала варьируется от  $-50$  В до  $-30$  В. Это является показателем устойчивой катодной поляризации, поскольку в этом случае электрическая коррозия предотвращается на всей рассматриваемой зоне.

Очевидным является факт, что в случае замыкания контактной сети на заземлитель, потенциал последнего будет иметь максимальное значение в месте замыкания. По аналогии с вариантом с подземным заземлителем, далее будет рассматриваться режим замыкания на заземлитель нечетного пути через сопротивление в  $100$  Ом.

На рисунке В.5 представлено распределение потенциала заземлителя нечетного пути при различных местах замыкания. Видно, что в сравнении с рисунком 4.10, максимальные значения потенциалов значительно возросли: при использовании подземного заземлителя потенциал в месте замыкания не превышал  $5,5$  В, в случае с комбинированным заземлителем он достигает  $130$  В. При этом, удаление места замыкания от тяговых подстанций приводит к увеличению потенциала в месте замыкания.

Еще одним важным моментом является появление зоны положительного потенциала, которая охватывает всю межподстанционную зону при всех координатах места замыкания. Причина этого кроется в том, что в сравнении с подземным заземлителем, комбинированный имеет очень большое переходное сопротивление. Вследствие этого снижение положительного потенциала, создаваемого током замыкания происходит намного медленнее, увеличивая тем самым зону по-

ложительного потенциала.

По той же причине потенциалы рельсовой сети обоих путей и смежного заземлителя составляют десятые доли вольта и далее не приводятся.

В результате применение комбинированного заземлителя позволяет добиться устойчивой катодной поляризации опор контактной сети в нормальном режиме и режиме короткого замыкания контактной сети на рельс. В режиме замыкания на заземлитель наблюдаются обширные зоны положительного потенциала, в которых возможна электрическая коррозия опор. В целом комбинированный заземлитель по устойчивости поляризации превосходит подземный заземлитель.

Следующим вариантом является конструктивное исполнение с применением заземляющего провода. Из конструкции и рисунка 1.13 ясно, что принципиальных различий в распределениях потенциалов элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» по сравнению с комбинированным заземлителем быть не должно. Отсутствие вертикальных заземляющих электродов приведет к еще большему увеличению переходного сопротивления между заземлителем и землей, что в свою очередь должно привести к усилению катодной поляризации.

По аналогии с предыдущими вариантами конструктивного исполнения вывод об устойчивости поляризации будет производиться на основе анализа графиков распределений потенциалов в нормальном и аварийном режимах.

На рисунках Б.5 – Б.8 приведены распределения потенциалов рельсов и заземляющих проводов обоих путей в нормальном режиме работы участка при пропуске двух пакетов поездов. Их рисунков видно, что распределение потенциалов всех элементов схожи с аналогичными распределениями, полученными для комбинированного заземлителя. По нечетному пути максимальное значение потенциала рельсов равно 90 В, по четному – 35-55 В. Стоит отметить, что в случае с комбинированным заземлителем соответствующие пиковые значения составили 90 и 80 В соответственно.

Распределение потенциала заземлителя так же совпадает по форме с аналогичными распределениями при использовании комбинированного заземлителя. При этом в середине межподстанционной зоны максимальное значение потенциа-

ла заземлителя варьируется в пределах  $-5$ — $-22$  В. Таким образом потенциал заземлителя при использовании заземляющего провода ниже, чем при использовании комбинированного заземлителя, что является показателем более устойчивой катодной поляризации в нормальном режиме.

Распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» при использовании заземляющего провода при глухом коротком замыкании контактной сети на рельсы нечетного пути представлены на рисунках В.6–В.9. Видно, что отсутствие вертикальных заземляющих электродов практически не повлияло на потенциал рельсов обоих путей: пиковые значения варьируются в тех же пределах, что и при использовании комбинированного заземлителя. В тоже время, из распределения потенциалов заземляющего провода четного и нечетного путей видно отсутствие зон положительного потенциала. Кроме того, максимальное значение потенциала в середине межподстанционной зоны для обоих путей варьируется в пределах от  $-60$  до  $-35$  В, которые ниже, чем у комбинированного заземлителя.

В целом в режиме замыкания контактной сети на рельсовую сеть нечетного пути наблюдаются более низкие потенциалы заземлителей обоих путей, что является показателем более устойчивой катодной поляризации в сравнении с аналогичным режимом при использовании комбинированного заземлителя.

В режиме замыкания на заземлитель при использовании заземляющего провода ожидаемо повышение потенциала в месте замыкания, исходя из увеличения переходного сопротивления заземлителя относительно земли. Это подтверждает рисунок В.10. Видно, что в сравнении с комбинированным заземлителем пики потенциала выше: максимальное значение потенциала заземлителя достигает  $140$  В. При использовании комбинированного заземлителя аналогичный максимум составлял  $130$  В. Кроме этого, также наблюдается значительная протяженность зоны положительного потенциала и повышение пиков по мере удаления места замыкания от тяговых подстанций.

Использование заземляющего провода с точки зрения потенциального уменьшения интенсивности электрокоррозии опор видится более эффективным,

за счет снижения потенциала заземлителя в нормальном режиме и в режиме замыкания на рельсовую сеть. В режиме замыкания на заземлитель наименьшие потенциалы были получены при использовании подземного заземлителя. При использовании комбинированного заземлителя и заземляющего провода необходимо обеспечить минимальное время замыкания контактной сети на заземлитель, поскольку в таком режиме будут создаваться условия для протекания электрокоррозии подземных частей опор, соединенных с заземлителями.

### **4.3 Оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения по условиям электробезопасности**

По критерию электробезопасности оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения сводится к сравнению величины напряжения прикосновения с допустимыми значениями в нормальном и аварийном режимах. В разделе 4.1 были приведены действующие отечественные и зарубежные нормы по величине напряжения прикосновения, исходя из которых в качестве допустимой величины в нормальном режиме было принято значение в 120 В, а для аварийного режима значение в 669 В.

Оценка величины напряжения прикосновения может быть выполнена на основе распределения потенциалов вдоль оси пути. Указанные распределения были приведены в разделе 4.3 для нормального и аварийных режимов.

Для варианта с подземным заземлителем распределение потенциалов рельсовой сети и протяженных заземлителей обоих путей приведены на рисунках 4.1-4.4, из которых видно, что в потенциал рельсов нечетного пути относительно земли не превышает 70В в анодной зоне и не снижается ниже -35В в катодных зонах, для четного пути эти значения равны 30В и -35В соответственно. При этом, потенциал протяженных заземлителей обоих путей в анодной зоне не превышает 20В, в катодных – -35В.

По рисункам 4.1-4.4 сложно проследить изменение потенциала при движении пакетов поездов, поскольку рассматриваются заданные моменты времени. На рисунке 4.12 приведены зависимости потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с применением подземного заземляющего электрода при пропуске пакетов поездов. Аналогичные зависимости потенциалов рельсовой сети и протяженного заземлителя в местах расположения тяговой подстанций «Сабик», а также в местах расположения поста секционирования «Берлога» и пунктов параллельного соединения «ППС 5,6», «ППС 1693», «ППС 1704», «ППС 1707» приведены в приложение Г (рисунки Г.1-Г.13). В том же приложении приведены графики для остальных вариантов конструктивного исполнения. Очевидно, что именно в этих местах вероятность прикосновения к рельсовой сети и протяженному заземлителю наиболее высока.

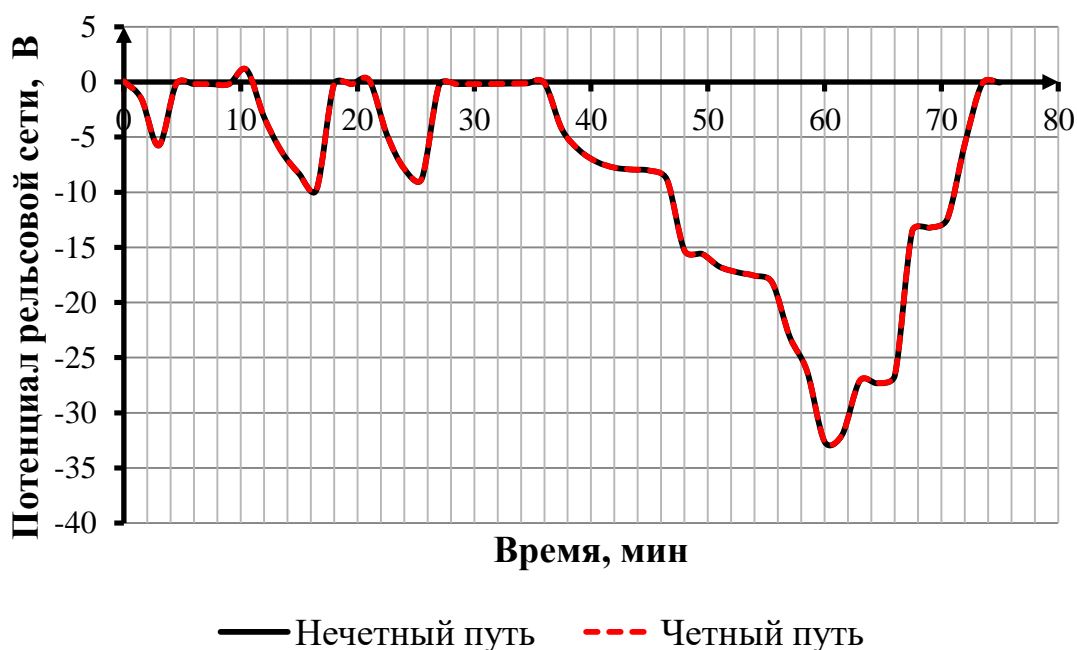


Рисунок 4.12 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

Вблизи тяговой подстанции «Сарга» потенциал рельсовой сети обоих путей

варьируется от 0 до -40В; вблизи подстанции «Сабик» – от 0 до -35В. У «ПС Берлога» – от 0 до 60В; у «ППС 5,6» – от 15 до -25В; у «ППС 1693» – от 0 до 45 В; у «ППС 1704» – от 0 до 50В; у «ППС 1707» – -25В до 15 В. Аналогичные значения для потенциала заземлителя составляют: для подстанции «Сарга» – от 0 до -40В; для подстанции «Сабик» – от 0 до -50В; для «ПС Берлога» – от 0 до 16В; для «ППС 5,6» – от 3В до -11В; для «ППС 1693» – от 0 до 16В; для «ППС 1704» – от -2В до 10В; для «ППС 1707» – от -10В до 2В.

Таким образом, в нормальном режиме при пропуске пакетов поездов в четном и нечетном направлении потенциал рельсовой сети и заземлителя обоих путей не превышает допустимого значения 120 В. В этом случае нет необходимости дополнительно рассчитывать величину напряжения прикосновения.

В режиме короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть на нечетном пути потенциалы элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» возрастают. Это можно увидеть из рисунков 4.5 – 4.8. Потенциал рельсовой сети в месте короткого замыкания варьируется от 270В до 390В, при этом потенциал рельсовой сети смежного пути имеет единственный максимум в месте установки междупутного соединителя, достигающий 200В. В местах расположения тяговых подстанций потенциал рельсов обоих путей не снижается ниже -90В – -100В. Потенциал заземлителя обоих путей имеет максимумы, варьирующиеся от 40В до 90В, у тяговых подстанций потенциал не снижается ниже -110В – -160В.

Помимо распределения потенциалов вдоль всей рассматриваемой межподстанционной зоны необходимо рассмотреть влияние удаленности места замыкания на потенциал рельсовой сети и заземлителя в местах расположения тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения. На рисунке 4.13 представлены графики зависимости потенциала рельсовой сети вблизи подстанции «Сарга» от координаты места короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути.



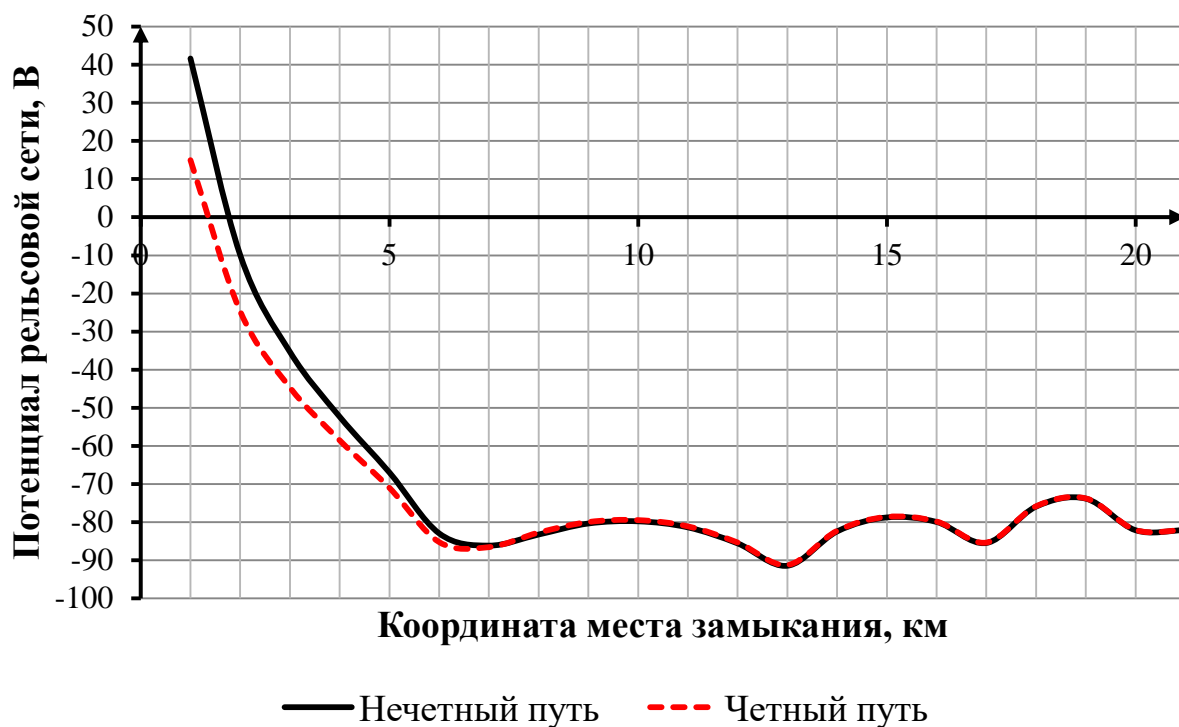


Рисунок 4.13 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

Аналогичные графики для потенциала вблизи подстанции «Сабик», поста секционирования и пунктов параллельного соединения представлены в приложении Д. В том же приложении приведены графики для остальных вариантов конструктивного исполнения. Из рисунков Д.1-Д.13 видно, в силу влияния рельсовой сети на подземный электрод, зависимость его потенциала от координаты места замыкания схожа с аналогичной зависимостью для потенциала рельсовой сети. Кроме того, максимум потенциала как рельсовой сети, так и электрода наблюдается в том случае, если координата замыкания близка к месту расположения тяговой подстанции, поста секционирования или пункта параллельного соединения. Наибольшие значения потенциалов наблюдаются вблизи «ПС Берлога» и «ППС 1704», которые наиболее удалены от обеих подстанций. При замыкании контактной сети на рельс вблизи этих сооружений максимум потенциала рельсовой сети достигает 360 В и 380 В соответственно, а потенциал заземлителя достигает 85В и

80В соответственно. Во всех остальных вариантах расположения места замыкания потенциалы элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» ниже указанных значений.

Таким образом, в режиме короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть потенциалы элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно земли не превышают допустимого значения 669 В, что является показателем безопасности рассматриваемого варианта конструктивного исполнения.

Проанализировать режим замыкания контактной сети на заземлитель можно с помощью рисунков 4.10, 4.11, из которых видно, что в этом режиме потенциал заземлителя, на который происходит замыкание, не превышает 6 В, а потенциал смежного заземлителя не превышает 2В. При этом потенциал рельсовой сети обоих путей практически равен нулю. Указанные значения много ниже допустимого напряжения прикосновения даже для продолжительного воздействия (120 В). Несомненно, снижение сопротивления цепи замыкания будет приводить к повышению потенциалов, но вариант глухого замыкания при использовании подземного заземлителя практически исключен в силу конструктивных особенностей. Таким образом, в режиме замыкания контактной сети на заземлитель вариант конструктивного исполнения с применением подземного заземлителя удовлетворяет требованиям электробезопасности.

Далее будет рассматриваться вариант с применением комбинированного заземлителя. Для этого варианта распределение потенциалов рельсовых сетей и заземлителей обоих путей в нормальном режиме приведены на рисунках Б.1-Б.4, из которых видно, что повышение переходного сопротивления заземлителя приводит к повышению абсолютных значений потенциалов рельсовой сети и заземлителя. Потенциал рельсов нечетного пути в анодной зоне достигает 90-95 В, в катодной – -30В. Для четного пути указанные величины равны 80 и -30 В соответственно. При этом потенциал заземлителей обоих путей не имеет анодных зон в принципе: вблизи тяговых подстанций значение потенциала достигает значений -35 – -45 В, при этом в середине межподстанционной зоны он не снижается ниже -20 В. Из указанных максимальных значений потенциалов видно, что они не пре-

вышают допустимого значения напряжения прикосновения в 120 В, принятого для нормального режима.

Далее по аналогии с предыдущим вариантом конструктивного исполнения необходимо рассмотреть зависимость потенциалов от времени в нормальном режиме в местах наиболее вероятного нахождения обслуживающего персонала. На рисунке 4.14 представлены зависимости потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с применением комбинированного заземлителя.

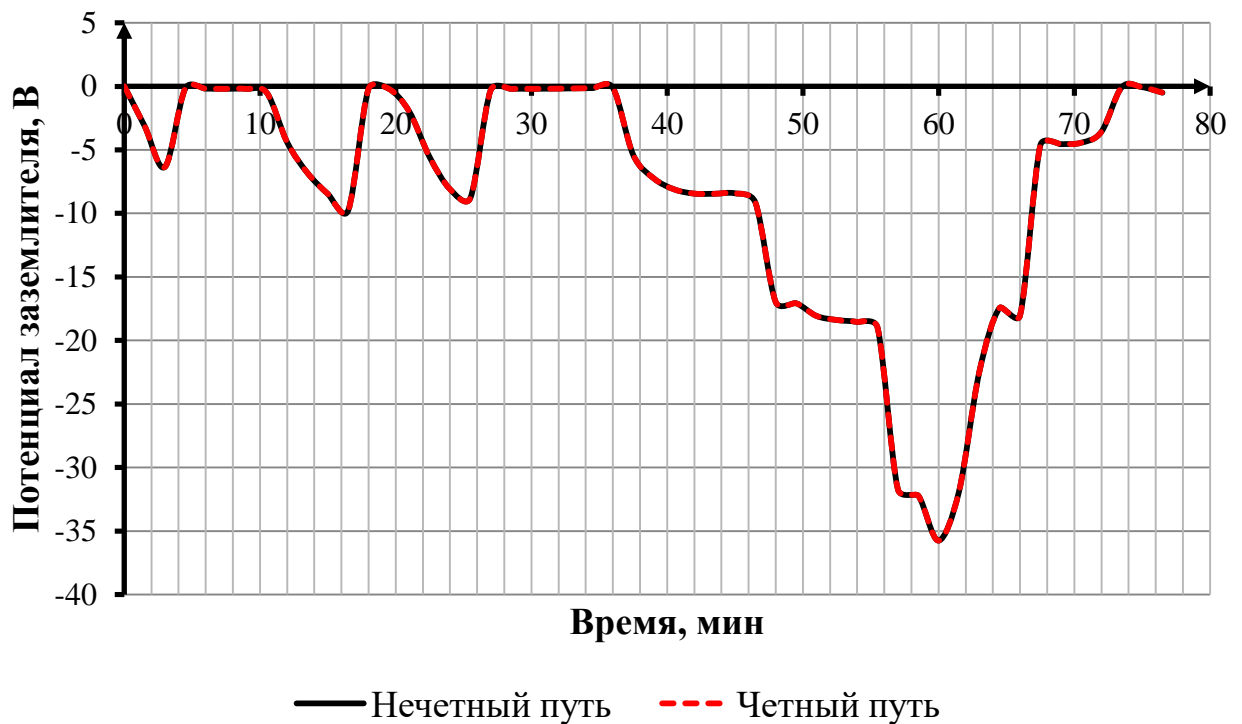


Рисунок 4.14 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

На рисунках Г.14-Г.26 приведены аналогичные зависимости потенциалов элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» от времени в местах расположения тяговых подстанций, поста секционирования и пунктов параллельного соединения. Вблизи тяговой подстанции «Сарга» потенциал рельсовой сети обоих

путей варьируется от 0 до -35 В; вблизи подстанции «Сабик» – от 0 до -47 В. У «ПС Берлога» – от 0 до 90В; у «ППС 5,6» – от 15 до -25В; у «ППС 1693» – от 0 до 87 В; у «ППС 1704» – от 0 до 60 В; у «ППС 1707» – -25В до 18 В. Аналогичные значения для потенциала заземлителя составляют: для подстанции «Сарга» – от 0 до -35 В; для подстанции «Сабик» –от 0 до -47В; для «ПС Берлога» – от 0 до -20 В; для «ППС 5,6» – от 0 до -32 В; для «ППС 1693» – от 0 до -20 В; для «ППС 1704» – от 0 до -28 В; для «ППС 1707» – от 0 до -42 В.

Таким образом, в нормальном режиме при пропуске пакетов поездов потенциалы элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли не превышают допустимого значения напряжения прикосновения в 120 В.

Режим короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть также рассматривается только для нечетного пути, поскольку при замыкании на четном пути распределения потенциалов будут аналогичными. Анализ максимальных величин потенциалов в этом режиме можно провести по рисункам В.1-В.5. Потенциал нечетного пути имеет максимальные значения в местах замыканий, которые варьируются от 200 В до 470 В, при этом вблизи тяговых подстанций потенциал не снижается ниже 100 В. Потенциал четного пути имеет максимум в месте расположения междупутной перемычки, который достигает 250 В, при этом вблизи тяговых подстанций он не снижается ниже -100 В. Потенциал заземлителя, как и в нормальном режиме не имеет анодных зон, при этом вблизи тяговых подстанций он достигает значений -105 В – -140 В, а в середине межподстанционной зоны не снижается ниже -50 В.

Анализ влияния места расположения замыкания на потенциал рельсовой сети и заземлителя у тяговых подстанций, поста секционирования и пунктов параллельного соединения можно выполнить с помощью рисунков Д.14-Д.27 приложения Д. При использовании комбинированного заземлителя положительные максимумы в месте замыкания присутствуют только у потенциала рельсовой сети обоих путей, при этом потенциал заземлителя остается стабильно отрицательным. Наибольшие значения потенциалов рельсовой сети наблюдаются вблизи «ПС

Берлога» и «ППС 1704», также как и при использовании подземного заземлителя, и достигают 450 В. Потенциал заземлителя вблизи указанных сооружений варьируется от -45 В до -90 В. При этом вблизи тяговых подстанций его потенциал ниже и достигает значений -80 В – -105 В у подстанции «Сарга» и -100 В – -135 В у подстанции «Сабик».

Из представленных максимальных значений потенциалов элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли ни одно не превысило допустимого значения в 669 В, что говорит о безопасности устройства в этом режиме.

Режим замыкания контактной сети на заземлитель будет также рассматриваться при замыкании на нечетном пути, для сопротивления замыкания, равного 100 Ом. В этом режиме наблюдается значительное повышение потенциалов заземлителя, на который происходит замыкание. Такой вывод можно сделать по рисунку В.5. Наибольшее значение потенциала заземлителя нечетного пути достигает 130 В при замыкании в середине межподстанционной зоны. При этом, в силу большого переходного сопротивления заземлителя, потенциал рельсов обоих путей и смежного заземлителя не достигает 1 В. Исходя из того, что режим замыкания на заземлитель будет отключаться также быстро, как и короткое замыкание на рельсовую сеть, можно сделать вывод о безопасности этого режима при использовании комбинированного заземлителя, поскольку максимальное значение потенциала относительно земли всех элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» ниже допустимого значения в 669 В.

Для варианта с применением заземляющего провода распределение потенциалов рельсов и заземлителей обоих путей в нормальном режиме приведены на рисунках Б.5-Б.8, из которых видно сходство с аналогичными распределениями для варианта с применением комбинированного заземлителя. Максимальное значение потенциала рельсовой сети нечетного пути в анодной зоне составило 90 В, в катодной зоне минимальное значение – -30 В. Потенциал четного пути имеет единственный максимум потенциала в анодной зоне в месте междупутного соединителя, который составил 53 В. Вблизи подстанций потенциал рельсов четно-

го пути также не превышает  $-30$  В. Потенциал заземлителей обоих путей практически повторяет аналогичные распределения, полученные для варианта с использованием комбинированного заземлителя: отсутствуют зоны положительного потенциала, а его наибольшее абсолютное значение наблюдается вблизи тяговых подстанций. Соответственно, вблизи подстанций потенциал заземлителя достигает значений  $-35$  В –  $-45$  В, а в середине межподстанционной зоны он не снижается ниже  $-22$  В.

Далее будут рассмотрены распределения потенциалов элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» в зависимости от времени в местах расположения тяговых подстанций, поста секционирования и пунктов параллельного соединения. На рисунке 4.15 представлены графики зависимости потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с применением заземляющего провода.

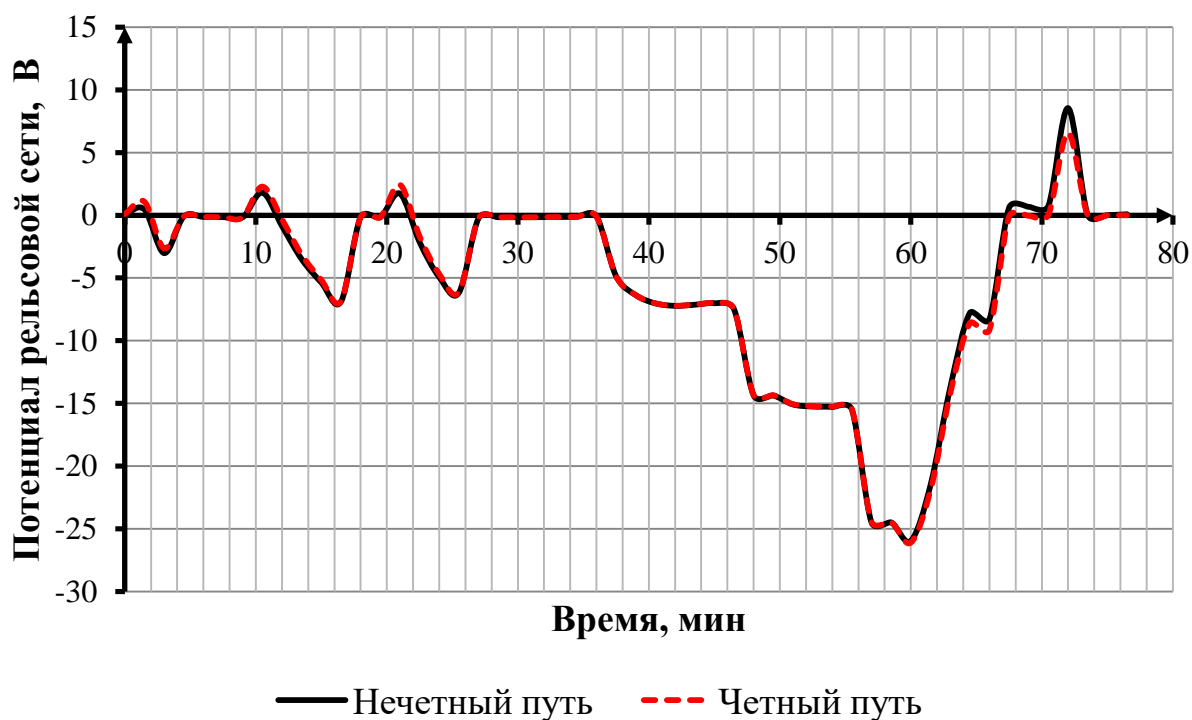


Рисунок 4.15 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

Из рисунков Г.27-Г.39 можно увидеть следующее: вблизи тяговой подстанции «Сарга» потенциал рельсовой сети обоих путей варьируется от 0 до -25 – -35 В; вблизи подстанции «Сабик» – от 0 до -33 – -47 В. У «ПС Берлога» – от 0 до 88 В; у «ППС 5,6» – от -15 до 25 В; у «ППС 1693» – от 0 до 86 В; у «ППС 1704» – от 0 до 60 В; у «ППС 1707» – -24 В до 17 В. Аналогичные значения для потенциала заземлителя составляют: для подстанции «Сарга» – от 0 до -36 В; для подстанции «Сабик» – от 0 до -48 В; для «ПС Берлога» – от 0 до -20 В; для «ППС 5,6» – от 0 до -32 В; для «ППС 1693» – от 0 до -20 В; для «ППС 1704» – от 0 до -28 В; для «ППС 1707» – от 0 до -42 В.

Таким образом, в нормальном режиме при использовании заземляющего провода потенциалы элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» относительно удаленной земли не превышают допустимого значения напряжения прикосновения в 120 В.

Анализ режима короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть по аналогии с предыдущими вариантами конструктивного исполнения будет проводиться для случая замыкания на нечетном пути. Собственно распределения потенциалов рельсов и заземлителя для варианта использования заземляющего провода приведены на рисунках В.6 – В.9, из которых видно сходство с аналогичными распределениями для варианта с применением комбинированного заземлителя. Также из рисунка В.6 видно, что в анодной зоне потенциал рельсов нечетного пути достигает 450 В, а в катодной зоне не снижается ниже -100 В при всех вариантах расположения места замыкания. Аналогичные значения для потенциала четного пути составляют 250 В и -100 В соответственно. Из рисунков В.7, В.9 видно, что потенциал заземлителя обоих путей не имеет положительных значений, при этом вблизи тяговых подстанций он не снижается ниже -110 – -140 В, а в середине межподстанционной зоны достигает значения -60 В.

Влияние удаленности места короткого замыкания на распределение потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» при замыкании контактной сети на рельсы нечетного пути иллюстрируют рисунки Д.28-Д.41 приложения Д. По аналогии с предыдущими вариантами зависимость потенциалов рассматрива-

ется в местах расположения тяговых подстанций, поста секционирования и пунктов параллельного соединения. При использовании заземляющего провода наибольшее значение потенциала рельсовой сети обоих путей наблюдается вблизи «ПС Берлога» и «ППС 1704». Величина потенциала составляет соответственно 440-450 В. Вблизи этих сооружений потенциал заземлителя достигает значений - 50 – -90 В. Как и при использовании комбинированного заземлителя вблизи тяговых подстанций потенциал заземлителя ниже.

По представленным максимальным значениям потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» можно сделать вывод, что при использовании заземляющего провода в режиме замыкания на заземлитель они не превысили допустимое значение напряжения прикосновения в 669 В.

При анализе режима короткого замыкания контактной сети на заземлитель при использовании заземляющего провода также рассматривается замыкание только на нечетном пути при сопротивлении в цепи замыкания 100 Ом. Распределение потенциала заземлителя нечетного пути иллюстрирует рисунок В.10, из которого видно сходство с аналогичным распределением при использовании комбинированного заземлителя. Наибольшее значение потенциала заземлителя наблюдается при замыкании в середине межподстанционной зоны и достигает значения в 140 В. При этом потенциал рельсов обоих путей и смежного заземлителя не достигает значения в 1 В. По аналогии с вариантом с использованием комбинированного заземлителя, при условии одинакового времени отключения выключателя с режимом короткого замыкания на рельс, потенциалы в системе «рельсы-протяженный заземлитель» при использовании заземляющего провода не достигают допустимого значения в 669 В, что говорит о безопасности этого варианта.

В целом по результатам оценки вариантов конструктивного исполнения с точки зрения электробезопасности можно сделать вывод, что все три варианта удовлетворяют требованиям по величине напряжения прикосновения как к рельсовой сети, так и к протяженному заземлителю.



#### **4.4 Оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения по работоспособности токовых защит фидеров тяговых подстанций**

Основным элементом токовой защиты фидера контактной сети постоянного тока является быстродействующий выключатель. Надежность срабатывания защит быстродействующего выключателя обеспечивается отстройкой его уставки от величины максимально рабочего тока в нормальном режиме, тем самым обеспечивается его срабатывание только при наличии короткого замыкания.

Оценка работоспособности токовых защит при различных вариантах конструктивного исполнения заземляющих устройств будет осуществляться на основе сравнения максимальных токов нормального режима и токов, протекающих по контактной сети и протяженному заземлителю в аварийных режимах. В результате наиболее эффективным будет выбран тот вариант, который будет обеспечивать максимальный разрыв между токами нормального и аварийных режимов. В качестве аварийных режимов будут рассматриваться режим короткого замыкания на рельсовую сеть и замыкания на протяженный заземлитель, вследствие перекрытия изоляции. При расчетах в качестве положительного направления тока принималось направление от питающих шин в контактную сеть или слева направо, исходя из чего на некоторых графиках токи имеют отрицательное значение.

Использование протяженного заземляющего устройства при любом варианте конструктивного исполнения практически не влияет на величину токов фидеров при коротком замыкании контактной сети на рельсовую сеть, поэтому ток заземлителя в этом режиме можно рассматривать как дополнительный признак наличия короткого замыкания.

При использовании горизонтального заземляющего электрода очевидным является перетекание токов между рельсовой сетью и заземлителем из-за наличия переходного сопротивления как в нормальном, так и в аварийном режиме. Этот вывод подтверждают рисунки 4.16 и 4.17

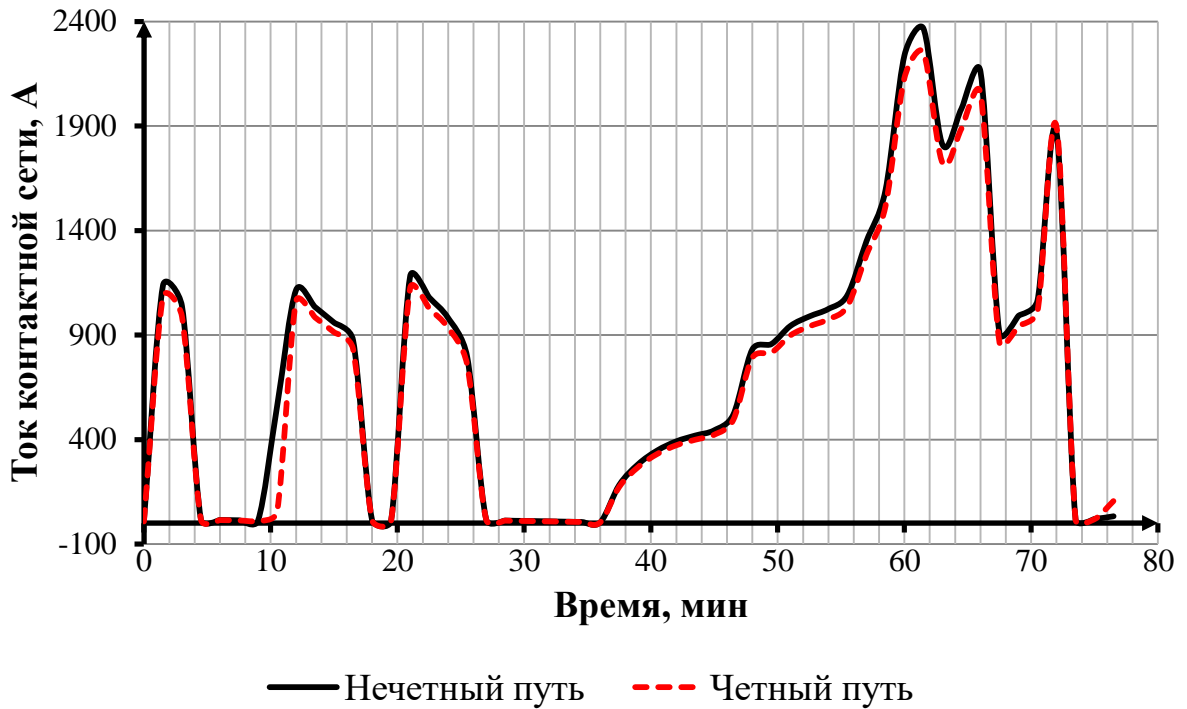


Рисунок 4.16 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении горизонтального заземляющего электрода

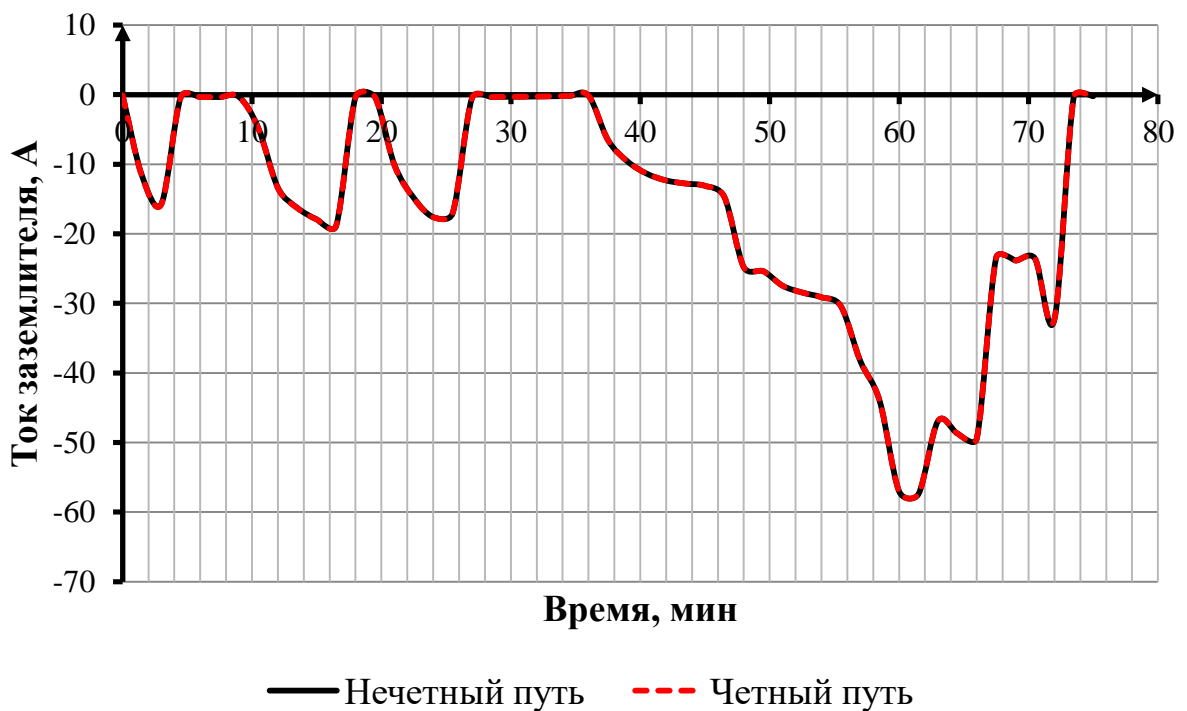


Рисунок 4.17 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении горизонтального заземляющего электрода

Аналогичные графики токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя для остальных вариантов конструктивного исполнения приведены в приложении Е.

Зависимость токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя от времени для подстанции «Сабик» иллюстрируют рисунки Е.1, Е.2. Соответственно на подстанции «Сарга» токи фидеров контактной сети достигают значений 2400 А, при этом ток в протяженном заземлителе достигает значения 60 А, в то же время на подстанции «Сабик» токи фидеров контактной сети достигают 3000А, при этом ток заземлителя не превышает 90А.

Для оценки величины токов в аварийных режимах необходимо оценить величину токов фидеров контактной сети и заземлителя в зависимости от удаленности места замыкания. Зависимость токов фидеров контактной сети подстанции «Сарга» при коротком замыкании контактной сети нечетного пути на рельсы нечетного пути от удаленности места замыкания иллюстрирует рисунок 4.18. Аналогичные графики для токов фидеров контактной сети и протяженных заземлителей обоих путей для подстанций «Сарга» и «Сабик» для всех рассматриваемых вариантов приведены в приложении Ж

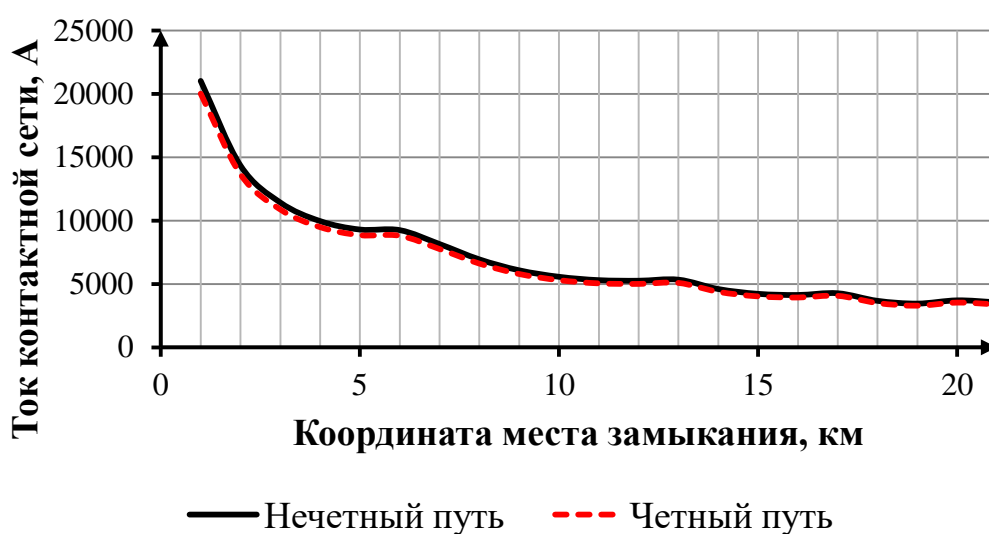


Рисунок 4.18 – Зависимость токов фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

Величину токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя в аварийных режимах для рассматриваемого варианта исполнения характеризуют рисунки Ж.1 -Ж.7. При коротком замыкании контактной сети на рельсовую сеть на нечетном пути ток фидеров контактной сети на подстанции «Сарга» достигает значений 20000 А при близких замыканиях и снижается до 5000 А при замыкании в середине межподстанционной зоны. При этом ток протяженного заземлителя варьируется от 95 до 300 А. На подстанции «Сабик» ток фидеров контактной сети также достигает значения в 20000 А при удаленности места замыкания на 1 км от подстанции, а в середине межподстанционной зоны также снижается до 5000 А. Ток протяженного заземлителя достигает значений в 125-325 А. При этом указанные величины тока наблюдаются не только у заземлителя, на котором произошло замыкание, но и на заземлителе смежного пути. Из представленных значений видно, что ток заземлителя в нормальном режиме меньше, чем в режиме короткого замыкания контактной сети на рельсы, однако при значительной нагрузке участка возможно приближение тока заземлителя к уровню тока при коротком замыкании. Это можно считать недостатком, поскольку в этом случае сложно произвести отстройку уставок. Помимо этого возникает проблема чувствительности защиты, поскольку ток смежных заземлителей в режиме замыкания на рельс практически одинаков по обоим путям.

Более сложная ситуация возникает при режиме замыкания на протяженный заземлитель. В этом случае на величину тока фидеров контактной сети и заземлителя оказывает влияние сопротивление в цепи замыкания, а также повышенное, по сравнению с рельсовой сетью, сопротивление самого заземлителя. При исследовании рассматривался случай замыкания через сопротивление 100 Ом. Более наглядно это иллюстрируют рисунки Ж.2, Ж.3, Ж.6, Ж.7. Из них видно значительное снижение как токов фидеров контактной сети, так и фидера протяженного заземлителя. На подстанции «Сарга» ток в контактной сети варьируется от 14 А при близких замыканиях до 10 А при замыкании в середине межподстанционной зоны. Ток заземлителя же достигает 1,5 А только при близких замыканиях. Аналогичная картина наблюдается на подстанции «Сабик». Большая разница токов

фидеров объясняется наличием связи между заземлителем и землей, что приводит к большой утечке тока в землю. Соотношение токов значительно затрудняет идентификацию режима замыкания на протяженный заземлитель, поскольку токи в аварийном режиме ниже, чем при пропуске пакетов поездов. С точки зрения работоспособности токовых защит вариант с применением подземного заземлителя является малоэффективным.

При моделировании варианта с применением комбинированного заземлителя принимается допущение о том, что у протяженного заземлителя нет распределенной связи с землей. Вместо этого в местах расположения вертикальных заземлителей и опор контактной сети задается сосредоточенная связь через их сопротивление растеканию. Таким образом, очевидным будет снижение тока заземлителя в нормальном режиме и его повышение в аварийном режиме в сравнении с предыдущим вариантом.

Зависимости токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя от времени в нормальном режиме для варианта с применением комбинированного заземлителя представлены в приложении Е. Из рисунков Е.3-Е.6 видно, что токи фидеров контактной сети на подстанции «Сарга» достигают значений 3000-4200 А, при этом ток фидера заземлителя не превышает 4 А. Аналогичные значения на подстанции «Сабик» составляют 2200-3000 А и 6 А соответственно. Таким образом, видно снижение тока протяженного заземлителя практически в 10 раз по сравнению с вариантом с подземным заземлителем.

Зависимости токов от координаты места замыкания для рассматриваемого варианта иллюстрируют рисунки Ж.8 -Ж.15. В режиме короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть ток фидеров контактной сети на подстанции «Сарга» достигает значений 20000 А при близких замыканиях и снижается до 5000 А при замыкании в середине межподстанционной зоны. Ток фидера протяженного заземлителя при этом варьируется от 1,5 до 8,75 А. На подстанции «Сабик» токи фидеров контактной сети достигают аналогичных значений, при этом ток заземлителя варьируется от 9 до 15 А. Кроме этого, из распределений тока заземлителя на обеих подстанциях видно, что при близких замыканиях ток заземли-

теля ниже, чем при удаленных. В силу отсутствия распределенной связи между рельсовой сетью и заземлителем при близких замыканиях ток слабо втекает в заземлитель, а удаление места замыкания от тяговой подстанции увеличивает количество сосредоточенных связей, участвующих в проведении тока замыкания. Это явление можно использовать для идентификации удаленных замыканий контактной сети на рельсовую сеть.

В целом в режиме замыкания контактной сети на рельсовую сеть протяженное заземляющее устройство практически не влияет на токи фидеров контактной сети, поэтому этот режим может быть отключен действующими системами защиты тяговых подстанций.

Режим замыкания контактной сети на протяженный заземлитель характеризуется меньшими токами фидеров контактной сети, но большими токами фидеров протяженных заземлителей. Это подтверждают рисунки Ж.10, Ж.11, Ж.14, Ж.15 приложения Ж. В этом режиме токи фидеров контактной сети значительно снижаются и достигают: на подстанции «Сарга» 14-15 А при близких замыканиях и 8 А при удаленных замыканиях, на подстанции «Сабик» наблюдаются аналогичные значения. Ток заземлителя на подстанции «Сарга» при этом достигает значений в 30 А при близких замыканиях и не снижается ниже 5 А при удаленных замыканиях. На подстанции «Сабик» значения токов заземлителя аналогичны. Важно отметить, что как и в предыдущем варианте, аварийные режимы моделируются только на нечетном пути, при этом в режиме замыкания на заземлитель ток заземлителя четного пути практически равен нулю. Это также объясняется отсутствием распределенной связи между протяженным заземлителем и землей и значительно улучшает селективность по сравнению с вариантом с применением подземного заземлителя. Кроме этого, в этом режиме токи заземлителя стабильно превышают токи в нормальном режиме, что значительно упрощает идентификацию режима замыкания на заземлитель. Таким образом, с точки зрения работоспособности токовых защит тяговых подстанций вариант с комбинированным заземлителем является эффективным по сравнению с вариантом с использованием подземного заземлителя.

Основное отличие варианта с применением заземляющего провода от предыдущего заключается в снижении числа сосредоточенных связей между землей и протяженным заземлителем, что в теории должно привести к меньшему стеканию тока из заземлителя в землю в режиме замыкания контактной сети на заземлитель.

Зависимость тока фидеров контактной сети и протяженного заземлителя от времени в нормальном режиме для рассматриваемого варианта конструктивного исполнения иллюстрируют рисунки Е.7-Е.10 приложения Е. Величины токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя практически идентичны значениям, полученным для варианта с применением комбинированного заземлителя.

Зависимости токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя в режиме короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть от координаты места замыкания иллюстрируют рисунки Ж.16, Ж.17 и Ж.20, Ж.21 приложения Ж. В этом режиме величины токов как фидеров контактной сети, так и фидеров тяговых подстанция идентичны варианту с применением комбинированного заземлителя. Из этого следует, что использование заземляющего провода практически не влияет на величины токов фидеров контактной сети в режиме замыкания на рельсовую сеть, поэтому этот режим может быть отключен действующими защитами тяговых подстанций.

Токи в режиме замыкания контактной сети на протяженный заземлитель иллюстрируют рисунки Ж.18, Ж.19 и Ж.22, Ж.23 приложения Ж, из которых видно, что величины токов фидеров контактной сети обеих подстанций практически идентичны токам, полученным для варианта с применением комбинированного заземлителя. При этом токи протяженного заземлителя при использовании заземляющего провода в среднем на 1-2 А больше, чем при использовании комбинированного заземлителя. Кроме того, ток заземлителя смежного пути при всех координатах места замыкания оставался практически равным 0 на обеих подстанциях.

В целом варианты конструктивного исполнения с применением комбинированного заземлителя и заземляющего провода одинаково эффективны с точки

зрения работоспособности токовых защит. Исходя из этого, более предпочтительным является вариант с применением заземляющего провода, поскольку он требует меньших капитальных затрат и полностью исключает земляные работы.

Исходя из приведенных величин тока в нормальном и аварийных режимах можно сформулировать условия срабатывания токовых защит фидеров тяговых подстанций для выбранного варианта конструктивного исполнения. Для режима короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть дополнительных условий не требуется, поскольку наличие протяженного заземлителя не влияет на величину тока замыкания в этом режиме. В режиме замыкания на заземлитель требуется срабатывание выключателей при очень малом токе в сравнении с действующими уставками. По результатам моделирования нормального режима видно, что даже при пропуске тяжеловесных поездов ток заземлителя не превысил 6 А. Таким образом, при токе заземлителя больше 7 А можно говорить о наличии режима замыкания на заземлитель. При моделировании этого режима сопротивление в цепи замыкания принималось равным 100 Ом. При меньшем сопротивлении токи замыкания будут возрастать, что упростит идентификацию этого режима при указанной уставке. При повышении сопротивления в цепи замыкания следует говорить уже не о режиме замыкания, а о локальной утечке тока через ослабленную изоляцию контактной сети. Этот режим будет характеризоваться очень малыми токами.

Для обеспечения срабатывания токовых защит при малых токах замыкания на заземлитель необходимо оборудовать провод, присоединяющий заземлитель к «минус» шине датчиком тока, сигнал с которого будет поступать на программируемый блок управления быстродействующим выключателем. Наиболее эффективным в этом случае будет датчик постоянного тока работающий на эффекте Холла, которые позволят осуществить гальваническую развязку силовой цепи и цепи контроля. Подобные датчики включают в себя магнитопровод с зазором и компенсационной обмоткой, датчик Холла и электронную плату обработки сигналов. Магниточувствительный датчик Холла закреплен в зазоре магнитопровода и соединен с входом электронного усилителя. При протекании измеряемого тока



по проводу, охватываемому магнитопроводом, в последнем наводится магнитная индукция. Датчик Холла, реагирующий на возникшее магнитное поле, вырабатывает напряжение, пропорциональное величине наведенной магнитной индукции. Выходной сигнал с датчика усиливается электронным усилителем и подается в компенсационную обмотку. В результате, по обмотке течет компенсационный ток, пропорциональный измеряемому току по величине и соответствующий ему по форме. Возникающее при этом магнитное поле компенсационной обмотки компенсирует магнитное поле измеряемого тока, и датчик Холла работает как нуль-орган.

Подобные датчики производят как за рубежом, так и в нашей стране. Одним из отечественных производителей является Научно-исследовательский институт электромеханики (НИИЭМ), производящий подобные датчики для измерения постоянных и переменных токов различной величины. В качестве измерительного прибора, контролирующего величину тока в заземлителе может быть использован датчик тока марки ДТХ производства НИИЭМ. Соответственно, допустимый ток датчика должен соответствовать максимально возможному току в режиме замыкания на заземлитель. Моделирование глухого короткого замыкания контактной сети на заземлитель при использовании заземляющего провода показало, что в этом режиме ток замыкания не превышает 3000 А. Исходя из этого, в качестве измерительного прибора необходимо использовать датчик ДТХ-3000-У [127], изображение которого приведено на рисунке 4.19.

Указанный датчик имеет габаритные размеры 120x125x110. Диаметр отверстия под шину составляет 40 мм. Датчик имеет массу 900 г и оборудован механическим креплением. Напряжение питания датчика составляет  $\pm 23,5-36,5$  В.

Размещение такого датчика внутри распределительного устройства постоянного тока 3,3 кВ не вызовет больших трудностей. Выход датчика тока будет подключен к программируемому блоку управления, который будет отключать быстродействующий выключатель фидера контактной сети при токе более 7 А.



Рисунок 4.19 – Изображение датчика тока ДТХ – 3000 – У

#### **4.5 Технико-экономическое сравнение вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств**

Постановление Правительства РФ от 15.05.14 № 445 «О внесении изменений в федеральную целевую программу «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» [132] предполагает направление значительной части бюджетных средств на снижение отказов и повышения надежности объектов инфраструктуры. Электрокоррозионные повреждения арматуры железобетонных опор и фундаментов являются одной из причин отказов опор, влекущих за собой перерывы в движении поездов. Дополнительные трудности вносит тот факт, что такие повреждения являются труднодиагностируемыми, поскольку арматура скрыта под поверхностью бетона.

Технико-экономическое обоснование выбора варианта конструктивного исполнения заземляющего устройства производится на основе расчета приведенных строительно-эксплуатационных расходов, определяемых с учетом капитальных затрат и эксплуатационных затрат [133]

$$Z_{\text{пр}} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E)^t} + (1-\gamma) \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+E)^t}, \quad (4.7)$$

где  $T$  – горизонт расчета;

$t$  – шаг расчета;

$K_t$  – капитальные затраты периода  $t$ ;

$E$  – норма дисконта ( $E = 0,08$ );

$\gamma$  – доля налоговых отчислений в приросте прибавочного продукта ( $\gamma = 0,2$ );

$C_t$  – эксплуатационные затраты периода  $t$ .

При оценке экономической эффективности по приведенным строительно-эксплуатационным расходам наиболее эффективным является вариант, у которого их величина наименьшая.

При определении приведенных расходов будет рассматриваться та же межподстанционная зона «Сарга» – «Сабик» Свердловской железной дороги протяженностью 21,36 км. Кроме этого принимается допущение, что все рассматриваемые варианты возводятся заново, т.е. отсутствует демонтируемое или вновь используемое оборудование. Средняя длина пролета принимается равной 50 м. Таким образом, количество опор на участке будет равно 428.

Капитальные затраты включают в себя затраты на материалы, затраты на монтаж оборудования, а также затраты на социальные нужды (30,4 % от фонда оплаты труда).

Для трех рассматриваемых вариантов состав затрат на материалы будет различным по причине конструктивных особенностей. Для варианта с горизонтальным заземляющим электродом затраты на материалы будут включать: стальная арматура диаметром 12 мм, из которой будет выполняться заземляющий электрод, диодный заземлитель, датчик тока. Для варианта с комбинированным заземлителем: заземляющий трос, выполненный из провода ПБСМ-70, стальная арматура диаметром 12 мм, из которой будут выполняться вертикальные заземляющие

электроды, диодный заземлитель, датчик тока. Для варианта с заземляющим проводом: заземляющий провод ПБСМ-70, диодный заземлитель, датчик тока.

Стоимость монтажа устройств определяется по методике, описанной в [134].

Результаты расчета капитальных затрат все трех рассматриваемых вариантов приведены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Капитальные затраты рассматриваемых вариантов

Вариант	Материалы, тыс. руб.	Монтаж, тыс. руб.	Социальные нужды, тыс. руб.	Итого, тыс. руб.
Вариант с горизонтальным заземляющим электродом	822,58	95978,10	29177,34	125978,03
Вариант с комбинированным заземлителем	5164,62	78,21	23,78	5266,61
Вариант с заземляющим проводом	5124,30	56,97	17,32	5198,59

Из таблицы 4.4 видно, что с точки зрения минимума капитальных затрат лучшим является вариант с заземляющим проводом. Наиболее дорогим при этом является вариант с горизонтальным заземляющим электродом, поскольку стоимость земляных работ по возведению этой конструкции очень высока. При этом стоимость материалов для этого варианта является наименьшей.

Эксплуатационные затраты зависят от объема обслуживания рассматриваемого участка. Также к ним следует отнести амортизационные отчисления и отчисления на социальные нужды. Величина амортизационных отчислений зависит от срока эксплуатации устройства

$$a = \frac{1}{T_{\text{ЭКС}}}, \quad (4.8)$$

где  $T_{\text{ЭКС}}$  – срок эксплуатации объекта, лет.

Срок эксплуатации протяженного заземляющего устройства можно определить по сроку эксплуатации железобетонных опор и фундаментов контактной сети – 50 лет. Таким образом, ежегодные отчисления на амортизацию составят 2% от суммы первоначальных капитальных затрат.

Перечень работ при техническом обслуживании и их периодичность для каждого из рассматриваемых вариантов приведены в таблице 4.5 [135]

Таблица 4.5 – Перечень работ при техническом обслуживании опор контактной сети

	Вариант с горизонтальным заземляющим электродом	Вариант с комбинированным заземлителем	Вариант с заземляющим проводом
Осмотр всех видимых элементов заземляющего устройства	2 раза в год	2 раза в год	2 раза в год
Выборочное вскрытие грунта для осмотра элементов заземляющего устройства, находящихся в земле	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет	-
Измерения с проверкой исправности защитного устройства в цепи группового заземления	3 раза в год	3 раза в год	3 раза в год
Обслуживание датчика тока	2 раза в месяц	2 раза в месяц	2 раза в месяц

Из таблицы 4.5 видно, что вариант с применением заземляющего провода требует меньшего объема работ при обслуживании, поскольку не требует проведения работ по оценке состояния горизонтальных и вертикальных заземляющих электродов с их откопкой.

Для расчета заработной платы работникам по обслуживанию вариантов конструктивного исполнения используются нормы времени и нормативы численности, указанные в технологических картах на соответствующие виды работ [136-139].

Величины эксплуатационных затрат для рассматриваемых вариантов на первый год эксплуатации представлены в таблице 4.6

Из таблицы 4.6 видно, что в первый год эксплуатации всех вариантов конструктивного исполнения объем работ по их обслуживанию одинаков, исходя из чего, равны расходы на заработную плату и социальные нужды. Большую часть эксплуатационных расходов составляют амортизационные отчисления, зависящие от величины первоначальных капитальных затрат. Соответственно максимальное значение амортизационных отчислений имеет вариант с горизонтальным заземляющим электродом. Минимальны амортизационные отчисления у варианта с заземляющим проводом.

Таблица 4.6 – Эксплуатационные расходы для рассматриваемых вариантов

Вариант	Заработная плата, тыс. руб.	Отчисления на социальные нужды, тыс. руб.	Амортизационные отчисления, тыс. руб.	Суммарные эксплуатационные расходы, тыс. руб.
Вариант с горизонтальным заземляющим электродом	0,797	0,242	2519,560	2520,599
Вариант с комбинированным заземлителем	0,797	0,242	105,332	106,129
Вариант с заземляющим проводом	0,797	0,242	103,972	105,011

Приведенные строительно-эксплуатационные расходы за 10 лет эксплуатации для всех вариантов конструктивного исполнения приведены на рисунке 4.20

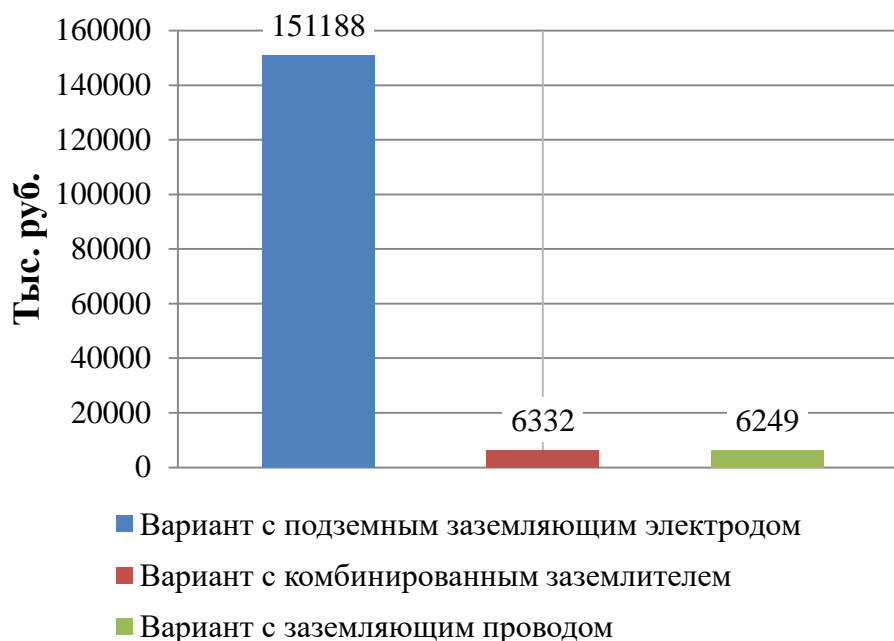


Рисунок 4.20 – Приведенные строительно-эксплуатационные расходы по вариантам конструктивного исполнения

Из рисунка 4.20 видна значительная разница в объемах приведенных строительно-эксплуатационных расходов за 10 лет эксплуатации, вызванная большим объемом капитальных затрат для варианта с горизонтальным заземляющим электродом.

Минимальная величина приведенных строительно-эксплуатационных расходов соответствует варианту конструктивного исполнения с применением заземляющего провода и составляет 6248701 рублей.

Таким образом, по результатам технико-экономического обоснования выбора варианта конструктивного исполнения протяженного заземляющего устройства наиболее предпочтительным является вариант с применением заземляющего провода.

В результате оценки вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств по четырем критериям была составлена итоговая таблица 4.7

Таблица 4.7 – Сравнение результатов оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения

Вариант конструктивного исполнения	Потенциальное уменьшение электрической коррозии	Электробезопасность	Работоспособность токовых защит	Приведенные строительно-эксплуатационные расходы, тыс. руб
С применением горизонтального заземляющего электрода	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Неудовлетворительно	151188
С применением комбинированного заземлителя	Удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	6332
С применением заземляющего провода	Удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	6249

Из таблицы видно, что с точки зрения рассмотренных критериев эффективности худшими показателями обладает вариант с применением подземного заземляющего электрода. Варианты с применением комбинированного заземлителя и заземляющего провода оказались практически одинаково эффективны. Однако с точки зрения технико-экономического обоснования более выгоден вариант с применением заземляющего провода, поскольку он полностью исключает земляные работы при монтаже заземляющего устройства.

#### **Выводы по четвертой главе**

1) Разработана методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения заземляющего устройства по четырем основным критериям: потенциальное уменьшение электрической коррозии, соответствие нормам электробезопасности и работоспособность токовых защит тяговых подстанций, технико-экономическое сравнение.

2) Предложена математическая модель участка постоянного тока, включающая в себя все элементы системы электроснабжения железных дорог: контактную и рельсовую сеть, протяженное заземляющее устройство и тяговые подстан-



ции.

3) Выполнено моделирование пропуска пакетов тяжеловесных поездов по действующему участку «Сарга» – «Сабик» для различных вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

4) Проведено моделирование аварийных режимов короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть и протяженный заземлитель на том же участке для различных вариантов конструктивного исполнения заземляющего устройства.

5) По результатам моделирования были получены распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» для различных моментов времени в нормальном режиме работы участка, а также в аварийном режиме. Также были получены зависимости токов фидеров контактной сети и протяженного заземлителя для тех же режимов работы участка.

6) Наиболее эффективным вариантом конструктивного исполнения признан вариант с применением заземляющего провода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1) На основании результатов анализа отечественных и зарубежных систем заземления и защиты железобетонных опор контактной сети от электрической коррозии была сформулирована концепция отказа от использования рельсовой сети в качестве заземляющего устройства.

Указанная концепция стала основой для разработки вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

2) Разработаны трехмерные модели различных железобетонных опор контактной сети и других поддерживающих конструкций. При моделировании учитывалась конфигурация арматурной сетки каждой конструкции, что позволило определить электрическое сопротивление конструкций с учетом сопротивления растеканию при различных удельных сопротивлениях грунта и бетона. Применение численных методов позволило оценить влияние наличия гидроизоляции и ее целостности на величину сопротивления растеканию всех рассматриваемых конструкций. В результате выявлено, что целостность гидроизоляции сильно влияет на сопротивление конструкций: наличие трещины площадью менее  $0,001 \text{ м}^2$  приводит к снижению сопротивления от 7 до 9 раз у нераздельных и раздельных опор соответственно.

3) Введено понятие взаимной проводимости между элементами системы «рельсы-протяженный заземлитель». Проведено исследование этой величины с помощью модели поперечного сечения пути, которая также позволила оценить величину переходных сопротивлений рельсовой сети и протяженного заземлителя. Численное моделирование позволило оценить влияние удельных сопротивлений элементов верхнего строения пути на указанные величины.

4) Разработана математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» одно- и двухпутного участка, учитывающая возможность протекания

токов между рельсами и заземлителями смежных путей и позволяющая оценить распределение потенциалов и токов в этой системе.

5) Разработана физическая аналоговая модель электрифицированного участка постоянного тока, оборудованного протяженным заземляющим устройством.

6) Проведена верификация математической модели путем сравнения результатов экспериментального исследования на физической аналоговой модели с результатами аналитического и численного исследований. Полученные результаты сошлись в пределах 10%.

7) Разработана методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженного заземляющего устройства, включающая оценку вариантов по нескольким критериям, а также по экономической эффективности.

8) Оценка эффективности вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств проведена на основании результатов моделирования нормального и аварийного режимов работы действующего участка «Сарга» – «Сабик» Свердловской железной дороги.

9) В результате оценки эффективности вариантов исполнения протяженного заземляющего устройства выявлено, что наиболее эффективным является вариант с применением заземляющего провода.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Котельников, А.В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, Л.П. Слободянюк – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев. – М. : Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2013. - 552 с.
3. Котельников, А.В. Оптимизация параметров цепей обратного тока тягового электроснабжения в условиях интенсификации движения и повышения весовых норм поездов / А.В. Котельников, А.В. Наумов, А.А. Наумов, Е.Э. Закиев // Вестник ВНИИЖТ – 2006 - №1 – С.3-12.
4. А.с. 583007 СССР, МПК В60М 5/00. Устройство для заземления опор контактной сети [Текст] / Котельников А.В., Иванова В.И., Наумов А.В., Порцелан А.А., Баранов Е.А.; заявитель ВНИИЖТ – Оpubл. 05.12.1977, Бюл. № 45. – 2 с. : ил.
5. Косарев, А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев – М. : Ин-текст, 2008. – 480 с.
6. Косарев, Б.И. Совершенствование защиты тяговых сетей постоянного тока при отсоединенных от рельсов опорах контактной сети / Б.И. Косарев, А.В. Симаков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. - № 11 – С.14-18.
7. Косарев, А.Б. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока / А.Б. Косарев, С.В. Логинов // Вестник ВНИИЖТ – 2009 – № 2 – С.9-14.

8. Кандаев В.А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: авторефер. дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.22.07 / Кандаев Василий Андреевич. – Омск, 2004. – 31 с.

9. Кандаев, В.А. Методика расчета заземляющего устройства с учетом сопротивления границы раздела «металл – грунт» / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.О. Сырецкая // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 – С. 69-73.

10. Кандаев, В.А. Совершенствование средств диагностирования заземляющих устройств / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.А. Медведева // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: мат. всеросс. науч.-техн. конф. – Омск : ОмГУПС, 2013. – С. 324-329.

11. Кандаев, В.А. Экспериментальные исследования коррозионного состояния железобетонных образцов при их искусственном старении / В.А. Кандаев, А.В. Пономарев, А.В. Колесник // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: мат. науч. конф. – Омск : ОмГУПС, 2015. – С. 221-227.

12. Кандаев В.А. Метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В.А. Кандаев, А.В. Пономарев, К.В. Авдеева, А.В. Колесник // Известия Транссиба. – 2016 – № 1(25) – С. 37-43.

13. Кандаев В.А. Распределение токов и потенциалов в системе подземных сооружений в поле блуждающих токов / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.В. Уткина, А.А. Медведева // Известия Транссиба. – 2016 – № 2(26) – С. 78-91.

14. Кузнецов, К. Б. Основы электробезопасности в электроустановках: учебное пособие / К. Б. Кузнецов. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 495 с.

15 А.с. 1141026 СССР, МПК В60М 5/02. Устройство для заземления опор контактной сети /Кузнецов К.Б., Кузнецова Г.С., Галузо А.А., Мезенцев А.П.; заявитель УЭМИИТ, Южно-Уральская ж.д. – Оpubл. 23.02.1985, Бюл. № 7. – 3 с. : ил.

16 Вайнштейн, А.Л. Коррозионные повреждения опор контактной сети / А.Л. Вайнштейн, А.В. Павлов. – М. : Транспорт, 1988. – 112 с.

17. Подольский, В.И. Повышение долговечности центрифугированных железобетонных опор контактной сети / В.И. Подольский// Теоретические и конструктивно-технологические разработки и рекомендации по повышению долговечности железнодорожных зданий и сооружений : межвуз. сб. науч. тр. – М. : МИИТ, 1988. – С. 78-86.

18. Шилкин, П.М. Защита контактной сети постоянного тока при различных способах заземления опор / П.М. Шилкин, А.А. Порцелан, А.В. Котельников. – М. : Транспорт, 1977. – 104 с.

19. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

20. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1 / Под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.

21. Белоголовский, А.Д. Защита подземных металлических сооружений от коррозии / А.Д. Белоголовский, И.В. Стрижевских, В.И. Дмитриев. – М. : Стройиздат, 1990. - 303 с.

22. Керимов, А.М. Закономерности, свойственные при исследованиях полей блуждающих токов / А.М. Керимов // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2012 – № 2 – С. 167-174.

23. Керимов, А.М. Заземляющие устройства, эксплуатируемые в поле блуждающих токов / А.М. Керимов, Г.Г. Исмаилова // Нефть, газ и бизнес. – 2012 – № 6 – С. 65-67.

24. Притула, В.В. Электродренажная защита от коррозии блуждающими токами/ В.В. Притула // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014 – №5-6 (45-46) – С. 18-23.

25. Башева, Е.П. Методы защиты производственных подземных коммуникаций от коррозии, вызванной блуждающими токами / Е.П. Башева, Д.А. Мироничева // Сб. тр. V междунар. конф. «Энергетика, информатика, инновации – 2015». – Смоленск : НИУ «МЭИ», 2015 – С. 6-11.

26. Пышкин, Д.А. Исследование влияния блуждающих токов на объекты инфраструктуры метрополитена / Д.А. Пышкин // Наука технологии инновации: Сб. науч. тр. в 9 ч. – Новосибирск, 2015. – С. 159-161.

27. Авдеева, К.В., Оценка обратного влияния двух подземных сооружений на ток утечки с рельсов электрифицированного железнодорожного транспорта постоянного тока / К.В. Авдеева, А.В. Уткина // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы II междунар. науч.-практ. конф. – Омск : ОмГУПС, 2016 – С. 6-13.

28. Медведева, А.А. Защита заземляющего устройства тяговой подстанции от коррозии блуждающими токами автоматической дренажной установкой / А.А. Медведева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017 – №2 – С. 109-118.

29. Вишнев, В.С. Кривые кажущегося сопротивления метода электроразведки блуждающими токами электрической железной дороги при различных параметрах модели источника / В.С. Вишнев // Уральский геофизический вестник. – 2017 – №2 (30) – С. 42-46.

30. Стрижевский, И.В. Подземная коррозия и методы защиты / И.В. Стрижевский; под ред. Я.М. Колтырина. – М. : Металлургия, 1986. - 112 с.

31. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 400с.

32. Данилин, А.Н. Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников / А.Н.Данилин, Д.В.Куклин, В.Н.Селиванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1. – С. 250-254.

33. Косарев, А.Б. Грозозащита и заземление опор контактной сети в системе тягового электроснабжения с высоковольтным питающим проводом и распределенным питанием / А.Б. Косарев, Д.В. Сербиненко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4 – С. 19-24.

34. Косарев А.Б. Расчет параметров электрического поля в земле с неоднородной электрической структурой при стекании тока с искусственного заземлителя / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016 – № 3 – С. 8-12.

35. Сидоров, А.И. О проблеме непрерывного контроля состояния заземляющего устройства / А.И. Сидоров, Тряпицын А.Б. // Наука ЮУрГУ: материалы 65-ой науч. конф. – Челябинск : ЮУрГУ, 2013 – С. 241-244.

36. Сидоров, А.И. Обзор компьютерных моделей для анализа состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын, Р.Т. Абдуллоев // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии – Челябинск : ЮУрГУ (НИУ), 2015 – С. 243-245.

37. Сидоров, А.И. Технические средства для определения состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын, Р.Т. Абдуллоев // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии – Челябинск : ЮУрГУ (НИУ), 2015 – С. 245-250.

38. Сидоров, А.И. Рациональное значение сопротивления заземления нейтрали по условиям электробезопасности / А.И. Сидоров, Ш.С. Саидалиев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016 – № 7-4 (49) – С. 59-62.

39. Пат. 161812 Российская Федерация, МПК G01R 19/145. Установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств [Текст] / Абдуллоев Р.Т., Сидоров А.И., Тряпицын А.Б.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». – 2015145568/28; заявл. 22.10.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13. – 14 с. : ил.

40. Сидоров, А.И. Диагностика состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, Р.Т. Абдуллоев // Наука. Технология. Производство - 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики: материалы всеросс. науч.-техн. конф. – Уфа : УГНТУ, 2016 – С. 247-250.



41. Сидоров А.И. Разработка плана отсеивающего эксперимента по исследованию влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств / А.И. Сидоров, Р.Т. Абдуллоев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т.6, № 2 – С. 52-58.

42. Сидоров, А.И. К вопросу о влиянии различных параметров грунта на коррозию заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.И. Солдатов, Б.Т. Абдуллоев и др. // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 6 – С. 5-8.

43. Шишигин, С.Л. Векторная форма записи потенциала стержневого заземлителя в однородной и двухслойной земле / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2007. – № 7 – С. 22-27.

44. Шишигин, С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2010. – №1 – С. 16-23.

45. Шишигин, С.Л. Сопротивление заземлителя в многослойной земле с границами произвольной формы / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2013. - № 4 – С.18-24.

46. Железнов Д.В. Применение обратного пассивного тягового провода с учетом сопротивления элементов железнодорожного полотна / Д.В. Железнов, Е.М. Тарасов, А.Г. Исайчева // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 6(48) – С. 14-17.

47. Наумов А.В. Потенциал рельсов и электробезопасность / А.В. Наумов, А.А. Наумов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 5 – С.20-23.

48. Авдеева, К.В. Расчет распределения электрических величин в системе «рельс-земля» / К.В. Авдеева, А.А. Медведева, Н.Ю. Шестакова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: мат. науч. конф. – Омск : ОмГУПС, 2015. – С. 227-233.

49. Петров, Ю.С. Аналитическое описание полей блуждающих токов на горных предприятиях / Ю.С. Петров, Ю.П. Масков, И.А. Берко // Труды СКГМИ (ГТУ) – 2015. – №22 – С. 108-113.

50. Скоков, Р.Б. Оценка условий электробезопасности заземления на рельс устройств тяговой сети в условиях применения изолирующих материалов при ка-

питальном ремонте железнодорожного полотна / Р.Б. Скоков, И.А. Кремлев, И.В. Тарабин, И.А. Терёхин // Известия Транссиба – 2015 – № 2 – С. 96-101..

51. Закарюкин, В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Моделирование аварийных режимов систем тягового электроснабжения при разземленных опорах контактной сети // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск : ИрГУПС, 2017 – Т.1 – С. 702-707.

52. Авдеева К.В., Кандаев В.А. Измерение сопротивления заземляющих устройств тяговых подстанций постоянного тока // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Омск : ОмГУПС, 2014 – С. 62-68.

53. Авдеева, К.В. Совершенствование методов и программно-аппаратных средств определения технического состояния заземляющих устройств тяговых подстанций / К.В. Авдеева, В.А. Кандаев – Омск: ОмГУПС, 2015. – 168 с.

54. Кандаев, В.А. Определение оптимального значения добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.А. Медведева, А.В. Уткина // Известия Транссиба – 2016 – № 3(27) – С. 83-91.

55. Медведева, А.А. Влияние нетканых материалов на распределение электрических величин в тяговой рельсовой сети / А.А. Медведева, К.В. Авдеева, А.В. Уткина, В.А. Кандаев // Наука. Технологии. Инновации: Сб. науч. тр. в 9 ч. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – С. 228-230.

56. Абдуллоев, Р.Т. Особенности конструктивного выполнения заземляющих устройств тяговых подстанций / Р.Т. Абдуллоев, А.Б. Тряпицын, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 66-ой науч. конф.– Челябинск : ЮУрГУ, 2014 – С. 551-554.

57. Абдуллоев, Р.Т. Факторы, влияющие на коррозию заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Достижения науки - агропромышленному производству: мат. междунар. науч.-техн. конф.– Челябинск : ЧГАА, 2015 – С. 93-96.

58. Абдуллоев, Р.Т. Планирование эксперимента по исследованию влияния внешних факторов на техническое состояние заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.И. Солдатов, А.Б. Тряпицын // Электробезопасность. – 2015 – № 4 – С. 38-42.

59. Абдуллоев, Р.Т. Исследование влияния водородного показателя грунта на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.И. Солдатов, А.Б. Тряпицын // Электробезопасность. – 2015 – № 4 – С. 54-63.

60. Абдуллоев, Р.Т. Физическое моделирование элементов заземлителей при учете электромагнитных процессов / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 67-ой науч. конф.– Челябинск : ЮУрГУ, 2015 – С. 467-473.

61. Абдуллоев, Р.Т. Исследование влияния температуры грунта на электрические параметры заземлителей в лабораторных условиях / Р.Т. Абдуллоев, , А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово : КУЗГТУ, 2015 – С. 33.

62. Абдуллоев, Р.Т. Исследование процесса коррозии заземляющего устройства / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Наука ЮУрГУ: материалы 68-ой науч. конф. – Челябинск : ЮУрГУ, 2016. – С. 354-358.

63. Абдуллоев Р.Т. Исследование в лабораторных условиях влияния влажности грунта на процесс коррозии заземляющих устройств // Электробезопасность. – 2016 – № 3 – С.37-43.

64. Кудрявцев, А.А. Несущая способность опорных конструкций контактной сети / А.А. Кудрявцев – М. : Транспорт, 1988. – 159 с.

65. Селедцов, Э.П. Эксплуатация опор контактной сети / Э.П. Селедцов, Е.А. Баранов – М. : Транспорт, 1970. – 95 с.

66. Шимони, К. Теоретические основы электротехники / К. Шимони – М.: Мир, 1964. – 685с.

67. Фигурнов, Е.П. Релейная защита : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Е.П. Фигурнов – М. : Желдориздат, 2002. - 719 с.

68. Костроминов, А.М. Модели заземляющих устройств в системах обеспечения движения поездов / А.М. Костроминов, О.Г. Евдокимова // Транспорт Урала. – 2012 – № 1 – С. 138-142.

69. Джура, Д.А. Приборы для измерения импульсного сопротивления заземляющих устройств / Д.А. Джура, В.Н. Селиванов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 4 – С. 56-66.

70. Герасимович, Д.А. Метод расчета электромагнитных характеристик уединенного стержневого заземлителя при стекании переменного тока промышленной частоты / Д.А. Герасимович, Е.А. Дерюгина // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2009 – № 5 – С. 21-32.

71. Куклин, Д.В. Применение метода конечных разностей во временной области для расчета волновых процессов в протяженных подземных проводниках / Д.В. Куклин// Труды Кольского научного центра РАН – 2011 – № 4 – С.100-106.

72. Куклин, Д.В. Расчет переходного сопротивления заземлителей энергетических устройств / Д.В. Куклин// Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 5 – С.117-121.

73. Терёхин, И.А. К вопросу электробезопасности при разземлении опор контактной сети / И.А. Терёхин, И.А. Кремлев // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6 – С.57-58.

74. Кремлев, И.А. Обеспечение эксплуатации контактной сети переменного тока без заземления опор на рельсы / И.А. Кремлев, Р.Б. Скобов, Г.С. Магай // Электроснабжение железных дорог: межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск : ОмГУПС, 2010. – С. 24-28.

75. Кондратьев, Ю.В. Современное состояние и перспективы развития опорного хозяйства железных дорог в РФ/ Ю.В. Кондратьев, И.А. Кремлев, И.А. Терёхин // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 31 – С.53-58.

76. Кремлев, И.А. Обеспечение чувствительности дистанционных защит фидеров контактной сети переменного тока на участках с разземленными опора-

ми / И.А. Кремлев, Ю.В. Кондратьев, В.А. Кващук, А.А. Кузнецов, И.А. Терёхин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6 – С.472-475.

77. Остапенко, А.Н. Защита опор контактной сети на линиях переменного тока при тяжеловесном движении / А.Н. Остапенко // *Транспорт Урала*. – 2011. – № 4 – С.96-101.

78. Митрохин, В.Е. Распределение волны тока молнии по протяженным металлическим сооружениям железнодорожного транспорта / В.Е. Митрохин, О.В. Гателюк, А.Е. Гаранин // *Транспорт Урала*. – 2010. - № 3 – С.51-54.

79. Полевой Ю.И. Модели рельсовых цепей с адаптивным приемником / Ю.И. Полевой // *Транспорт Урала*. – 2009. – № 2 – С.26-31.

80. Герасимович, Д.А. Математическое моделирование электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты / Д.А. Герасимович, Е.А. Дерюгин // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. – 2010. – № 4 – С.5-13.

81. Остапенко, А.Н. Экспериментальное исследование потенциалов рельсовой сети на участках переменного тока при разворачивании полигонов тяжеловесного движения на железных дорогах России / А.Н. Остапенко // *Вестник ВНИИЖТ*. – 2009. – № 6 – С.40-44.

82. Вайшнарас, А.В. Относительные рельсовые цепи / А.В. Вайшнарас // *Транспорт Урала*. – 2009. – № 2 – С.32-35.

83. Киселев, А.П. Исследование распределения потенциала при нарушении изоляции в системе контактная сеть – обратный провод – земля / А.П. Киселев, Б.И. Косарев // *Вопросы безопасности труда на железнодорожном транспорте: сборник научных трудов*. – М. : Транспорт, 1969. – 191 с.

84. Сибаров Ю.Г. О методике оценки условий безопасной эксплуатации контактной сети при отсоединении защитных опор от рельса / Ю.Г. Сибаров, В.П. Кручинин, Н.Н. Сколотнев // *Вопросы безопасности труда на железнодорожном транспорте: сборник научных трудов*. – М. : Транспорт, 1969. – 191 с.

85. А.с. 1209480 СССР, МПК В60М 5/00. Устройство для заземления опор контактной сети электрических железных дорог [Текст] / Хариков В.Ф., Савченко В.А. – Оpubл. 07.02.1986, Бюл. № 5. – 2 с. : ил.

86. Sandidzadeh, M.A. Controlling and Simulation of Stray Currents in DC Railway by Considering the Effects of Collection Mats / M.A. Sandidzadeh, A. Shafipour // Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway. – Rijeka, 2012. – 522 p.

87. Alamuti, M.M. Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems / M.M. Alamuti, N. Nouri, S. Jamali // IET Electrical Systems in Transportation. – 2011. – № 1-11. – P. 69-79.

88. Directive 2008/57/EC of the European parliament and of the council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community. – Official Journal of the European Union, 2008. – 45 p.

89. European standard EN 50122-1. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2011. – 88 p.

90. European standard EN 50122-2. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. – 29 p.

91. European standard EN 50122-3. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 3: Mutual Interaction of a.c. and d.c. traction systems. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. – 29 p.

92. Niasati, M. Overview of stray current control in DC railway systems / A. Gholami, M. Niasati // Railway Engineering. Challenges for Railway Transportation in Information Age. – Hong Kong, 2008.

93. Лесников, Д.В. Применение инновационных заземляющих устройств конструкций контактной сети и анализ зарубежных аналогов. / Д.В. Лесников //

Научные исследования: от теории к практике : мат. междунар. науч.–практ. конф. – Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 55-59.

94. Guangning, W. Study on the Performance of Integrated Grounding Line in High-Speed Railway. / W. Guangning, G. Guoqiang, D. Anping, Z. Lijun, C. Xiaobin, W. Wangang, W. Bo, T. Yuanfang, C. Jigang // IEEE transactions on power delivery – 2011. – vol. 26, no. 3 – pp. 1803-1809.

95. Ogunsola, A. Estimation of Stray Current From a DC-Electrified Railway and Impressed Potential on a Buried Pipe. / A. Ogunsola, A. Mariscotti, L. Sandrolini // IEEE transactions on power delivery – 2012. – vol. 27, no. 4 – pp. 2238-2246.

96. Tortia, A. M. L. Turin–Milan high speed railway line, 2 x 25 kv 50 Hz Ac electrified. EMC problems in earthing of exposed conductive parts / A. M. L. Tortia // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – SPEEDAM, 2006. – pp. 1127–1132.

97. Sels, T. The behavior of different earthing systems for electrified railways using AC voltages under short circuit conditions. / T. Sels, H. Maes // 19th International Conference on Electricity Distribution. – Vienna, 2007. – pp. 1-4.

98. Пат. 2581619 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/00, В 60 М 5/00. Устройство токовой защиты контактной сети постоянного тока [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2015100771/07 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 4 с. : ил.

99. Кузнецов, К.Б. Нетрадиционная конструкция заземления опор контактной сети, защищающая фундаменты от коррозии. / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Актуальные проблемы техносферной безопасности и природообустройства: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Благовещенск : ДальГАУ, 2014. – С. 108-112.

100. Кузнецов, К.Б. Инновационные заземляющие устройства опор контактной сети. / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Научные исследования: от теории к практике : мат. междунар. науч.–практ. конф. – Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 49-55.

101. Лесников, Д.В. Протяженное дренирующее заземляющее устройство. / Д.В. Лесников // Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные механизмы решения проблем научного развития» – Уфа : АЭТЭРНА, 2016. – С. 48-50.

102. Лесников, Д.В. О реализации концепции отказа от использования рельсов в качестве заземляющего устройства. / Д.В. Лесников // Сб. статей междунар. науч. – практ. конф. – Уфа : АЭТЕРНА, 2017. – С. 68-71.

103. Пат. 170556 Российская федерация, МПК В 60 М 1/12, В 60 М 5/00. Устройство заземления опор контактной сети участков постоянного тока железнодорожных станций [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2016102266 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 28.04.2017, Бюл. № 13. – 3 с. : ил.

104. Пат. 175748 Российская федерация, МПК В 60 М 5/00, В 60 М 3/00. Устройство заземления опор контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока с применением комбинированного заземлителя [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2017110564 ; заявл. 29.03.2017 ; опубл. 18.12.2017, Бюл. № 35. – 5 с. : ил.

105. Кандаев, В.А. Определение параметров границы раздела "арматура - бетон" по результатам анализа переходного процесса / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.В. Пономарев // Известия Транссиба – 2014. – № 4(20) – С. 85-92.

106. Кандаев, В.А. Совершенствование электрохимического метода определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В.А. Кандаев, А.В. Пономарев, А.В. Колесник // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Омск : ОмГУПС, 2014. – С. 102-108.

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



108. Анненков, В.З. Аналитический расчет импульсного сопротивления железобетонной стойки опоры ВЛ / В.З. Анненков // Электричество. – 2012. – № 7 – С. 72-73.

109. Шишигин, С.Л. Расчет сопротивления фундаментов опор ВЛ из железобетонных грибовидных подножников в неоднородном грунте / С.Л. Шишигин, А.Н. Новикова // Известия НИИ постоянного тока. – 2011. – № 65 – С.166 – 176.

110. Коровкин, Н.В. Расчетные методы в теории заземления / Н.В. Коровкин, С.Л. Шишигин // Научно-технические ведомости санкт-петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 166 – С. 74 – 79.

111. Кремлев, И.А. Расчетная модель электрического сопротивления железобетонных фундаментов опор контактной сети / И.А. Кремлев, Ю.В. Кондратьев, И.А. Терехин // Известия Транссиба – 2014. – № 2 – С.65 – 69.

112. Маслов, Г.П. Методика определения параметров границы раздела «арматура-бетон» / Г.П. Маслов, Н.Ю. Свешникова, А.В. Кандаев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1 – С. 282-286.

113. Терехин, И.А. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети, как электрического проводника / И.А. Терехин, И.А. Кремлев, Ю.В. Кондратьев, А.А. Кузнецов, Р.Б. Скоков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3 – С. 88-92.

114. Проект 4182И «Железобетонные трехлучевые фундаменты с заострением в подземной части для опор контактной сети» – М. : ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства», 2005. – 40 с.

115. Проект капитального ремонта и реконструкции заземляющих устройств контактной сети двухпутного участка ст. Катайск – ст. Долматово / К.Б. Кузнецов, Г.В. Звигинцева, В.Г. Бочкарев, Г.С. Кузнецова – Свердловск: УЭМИ-ИТ, 1991. – 39 с.

116. Лесников, Д.В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока. / Д.В. Лесников // Транспорт Урала. – 2017. - № 1 – С.71-76.

117. Кузнецов, К.Б. Совершенствование системы заземления при защите опор контактной сети постоянного тока от электрической коррозии / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Транспорт Урала. – 2016. – № 2 – С.113-118.

118. Лесников, Д.В. О возможности применения метода конечных элементов при расчете протяженного дренирующего заземляющего устройства. / Д.В. Лесников // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : м-лы международ. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017 — С. 80-92.

119. Тетельбаум, И. М. Модели прямой аналогии. / И. М. Тетельбаум, Я. И. Тетельбаум – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 373 с.

120. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр. систем» / В.А. Веников, Г.В. Веников – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984.–439 с.

121. Тихонов, А.И. Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): учебное пособие / А.И. Тихонов – Иваново : ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2011. – 132 с.

122. Кузнецов, К.Б. Принципы моделирования процессов в защитном заземлении опор контактной сети постоянного тока / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Вестник УрГУПС. – 2016. – № 1 – С.40-45.

123. Лесников, Д.В. Методы исследования системы «рельсы-протяженный заземлитель» / Д.В. Лесников // Техника и технологии наземного транспорта: мат. всеросс. науч. конф. аспирантов – Екатеринбург : УрГУПС, 2018 – С. 121-124.

124. ГОСТ 12.1.038 – 82(2001). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.zandz.ru/files/gost\\_12\\_1\\_038\\_82.pdf](http://www.zandz.ru/files/gost_12_1_038_82.pdf).

125. СТО РЖД 12.003-2011. Требования к техническому обслуживанию и ремонту тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://scbist.com/scb/uploaded/raspor-rzd/3278-sto-rzhd-12-003-2011-ot-22-noyabrya-2011-g-n-2514r-chast-1.htm>

126. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. ЦЭ – 868. Департамент электрификации и электроснабжения. – М. : Трансиздат, 2002. – 184 с.

127. Датчики тока. [Электронный ресурс] / АО «Научно-исследовательский институт электро-механики» – Режим доступа: <http://www.niiem46.ru>.

128. Датчики тока и напряжения на основе эффекта холла. [Электронный ресурс] / ООО «Кортех» – URL: <http://coretech.com.ua>

129. Чекмарев, А. Датчики тока NCS компании АВВ с диапазоном измерений от 2 кА до 40 кА / А. Чекмарев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2006. – № 8 – С. 50-53.

130. Портной, Г.Я. Современные магниточувствительные датчики холла и приборы на их основе / Г.Я. Портной // Вестник автоматизации. – 2013. – № 1(39) – С. 7-12.

131. Изолированные датчики тока и напряжения производства ООО «ТВЕЛЕМ». Характеристики - Применение – Расчеты [Электронный ресурс] / ООО «ТВЕЛЕМ» – Режим доступа: [http://www.efo-power.ru/BROSHURES\\_CATALOGS.html](http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS.html).

132. О внесении изменений в федеральную целевую программу «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» : постановление Правительства Российской Федерации от 15.05.14 № 445 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/70659782/>.

133. Волков, Б. А. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте : учеб. Пособие / Б. А. Волков – М. : Транспорт, 2009. – 152 с.

134. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений ОАО «РЖД». – М. : Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», 2007. – 41 с.

135. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. ЦЭ-191. – М. : Управление электрификации и электроснабжения МПС РФ, 1991 – 68 с.

136. Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Кн. I. Капитальный ремонт. ЦЭ № 197-5/1-2. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 1999. – 311 с.

137. Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Кн. II. Техническое обслуживание и текущий ремонт. ЦЭ № 197-5/1-2. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 1999. – 311 с.

138. Типовые нормы времени на капитальный ремонт устройств и оборудования тяговых подстанций. – М. : Трансиздат ("РИПИ"), 1997. – 287 с.

139. Нормы времени и нормативы численности на текущий ремонт и межремонтные испытания оборудования тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог. Департамент электрификации и электроснабжения. – М. : Трансиздат, 2007. – 283 с.

140. Отраслевые укрупненные нормативы цены конструктивных решений. ОНЦКРЖ 81-02-07-2017. – М., 2017. – 47 с.

141. Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России. Научно-методическое пособие / под ред. М.М. Толкачевой, Г.Е. Писаревского // Сб. науч. Тр. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2014. – 152 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЗАИМНЫХ  
ПРОВОДИМОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ СИСТЕМЫ  
«РЕЛЬСЫ-ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ»

Таблица А.1 – Взаимная проводимость рельсы второго пути-заземлитель первого пути, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001916	0,001593	0,001365
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001362	0,001189	0,001056
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001713	0,001450	0,001257
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001253	0,001105	0,000989
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001472	0,001272	0,001121
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001113	0,000994	0,000899

Таблица А.2 – Взаимная проводимость рельсы первого пути-заземлитель второго пути, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001916	0,001593	0,001365
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001362	0,001189	0,001056
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001713	0,001450	0,001257
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001253	0,001105	0,000989
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001472	0,001272	0,001121
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001113	0,000994	0,000899

Таблица А.3 – Взаимная проводимость рельсы второго пути-заземлитель второго пути, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,002046	0,001745	0,001522
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001426	0,001272	0,001149
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001816	0,001575	0,001391
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001307	0,001177	0,001070
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001548	0,001368	0,001227
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001155	0,001052	0,000966

Таблица А.4 – Взаимная проводимость заземлитель первого пути-заземлитель второго пути, См/м

$R_{земли}=150$ Ом·м	0,008552
$R_{земли}=250$ Ом·м	0,005135
$R_{земли}=350$ Ом·м	0,003671

Таблица А.5 – Взаимная проводимость рельсы первого пути-рельсы второго пути, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001271	0,001203	0,001143
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,000827	0,000797	0,000770
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001098	0,001046	0,001000
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,000748	0,000724	0,000701
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,000907	0,000871	0,000839
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,000650	0,000631	0,000614

Таблица А.6 – Переходное сопротивление заземлителей первого и второго пути, Ом·м

Первый путь		Второй путь	
$R_{земли}=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	140,98	$R_{земли}=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	140,98
$R_{земли}=250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	234,96	$R_{земли}=250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	234,96
$R_{земли}=350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	328,84	$R_{земли}=350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	328,84

Таблица А.7 – Переходное сопротивление рельсов первого пути, Ом·м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{земли}=250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{земли}=350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
$R_{шпал}=200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	588,93	740,74	892,06
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	801,28	953,29	1104,97
$R_{шпал}=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	650,62	802,57	954,20
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	865,05	1017,29	1168,22
$R_{шпал}=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	746,27	898,47	1050,42
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	965,25	1117,32	1269,04

Таблица А.8 – Переходное сопротивление рельсов второго пути, Ом·м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{земли}=250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{земли}=350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
$R_{шпал}=200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	588,93	740,74	892,06
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	801,28	953,29	1104,97
$R_{шпал}=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	650,62	802,57	954,20
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	864,30	1016,26	1168,22
$R_{шпал}=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{балласт}=3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	746,27	898,47	1050,42
	$R_{балласт}=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	965,25	1117,32	1269,04



Таблица А.9 – Взаимная проводимость рельсы -заземлитель однопутного участка, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м, h=0,7 м	$R_{земли}=250$ Ом·м, h=0,7 м	$R_{земли}=350$ Ом·м, h=0,7 м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001807	0,001566	0,001383
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001299	0,001170	0,001064
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001807	0,001566	0,001383
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001299	0,001170	0,001064
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	0,001807	0,001566	0,001383
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	0,001299	0,001170	0,001064

Таблица А.10 – Переходное сопротивление заземлителя однопутного участка, Ом·м

$R_{земли}=150$ Ом·м	138,87
$R_{земли}=250$ Ом·м	231,37
$R_{земли}=350$ Ом·м	323,94

Таблица А.11 – Переходное сопротивление рельсов однопутного участка, Ом·м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{земли}=150$ Ом·м	$R_{земли}=250$ Ом·м	$R_{земли}=350$ Ом·м
$R_{шпал}=200$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	648,51	798,08	947,87
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	864,30	1014,20	1162,79
$R_{шпал}=500$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	648,51	798,08	947,87
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	864,30	1014,20	1162,79
$R_{шпал}=1000$ Ом·м	$R_{балласт}=3000$ Ом·м	648,51	798,08	947,87
	$R_{балласт}=5000$ Ом·м	864,30	1014,20	1162,79

ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ  
«РЕЛЬСЫ-ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ» ОТНОСИТЕЛЬНО УДАЛЕННОЙ  
ЗЕМЛИ ОТ КООРДИНАТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ  
КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ  
УСТРОЙСТВ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

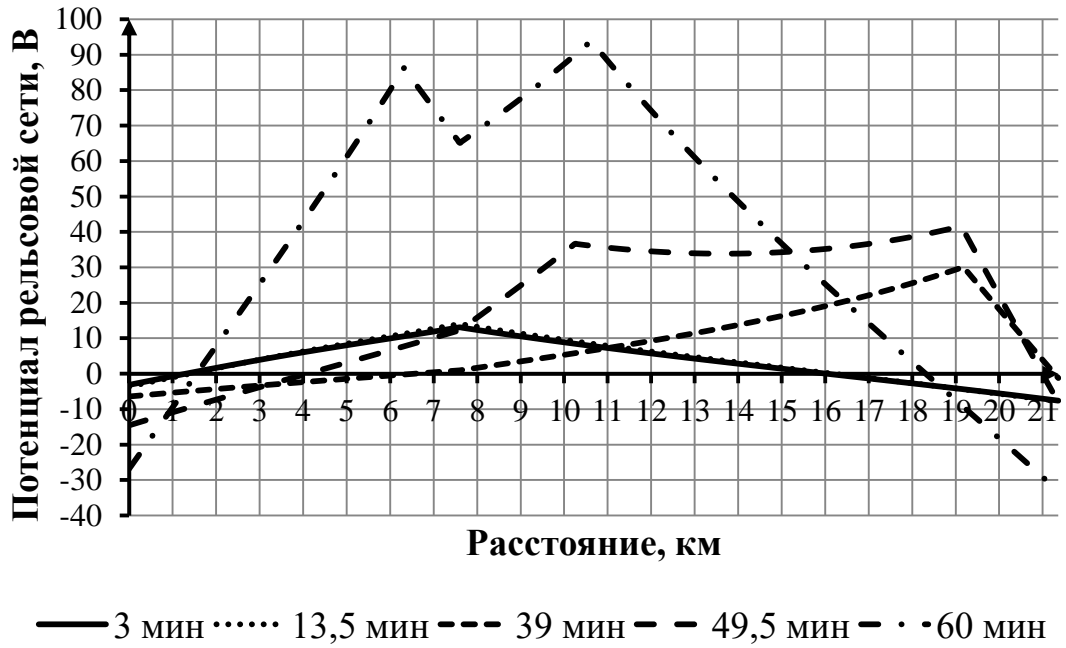


Рисунок Б.1 – Распределение потенциалов рельсов нечетного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта конструктивного исполнения с комбинированным заземлителем

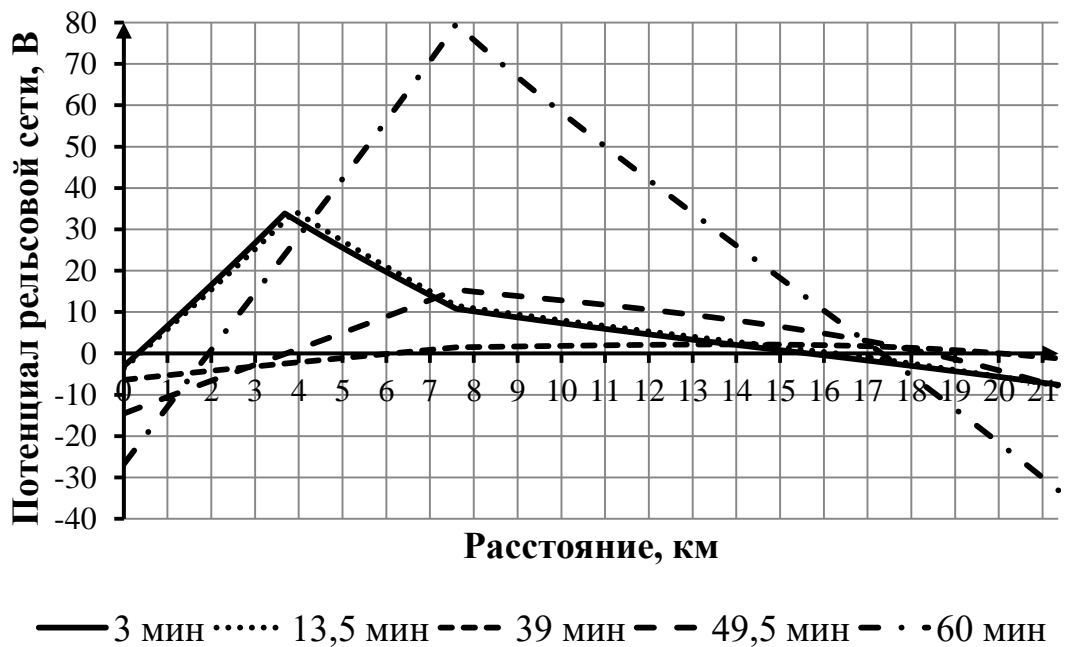


Рисунок Б.2 – Распределение потенциалов рельсов четного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением комбинированного заземлителя

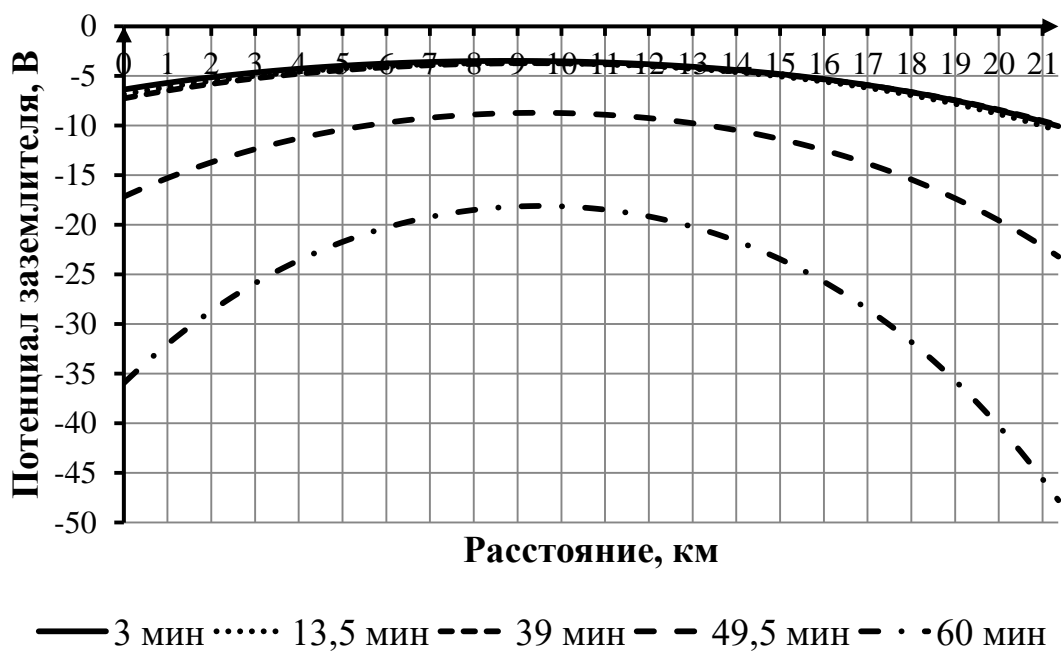


Рисунок Б.3 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением комбинированного заземлителя

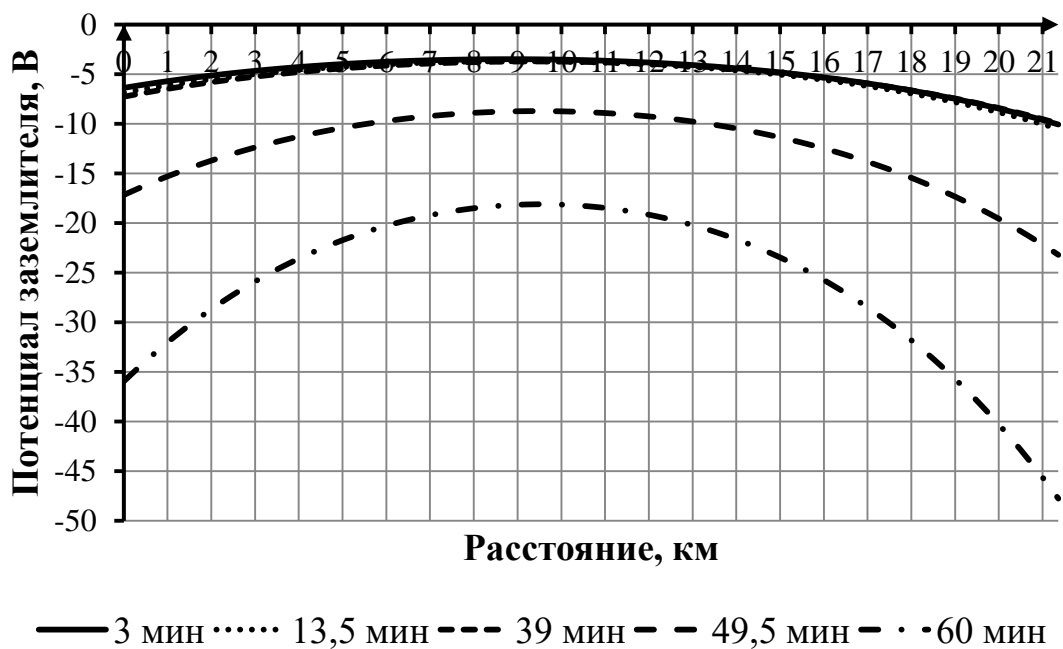


Рисунок Б.4 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением комбинированного заземлителя

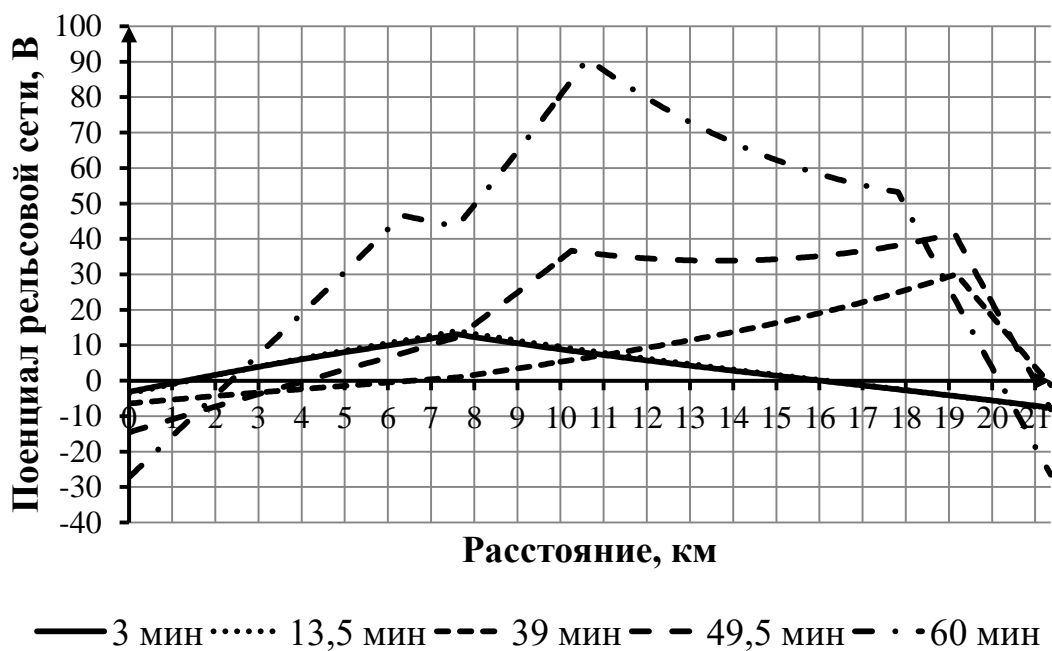


Рисунок Б.5 – Распределение потенциалов рельсов нечетного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением заземляющего провода

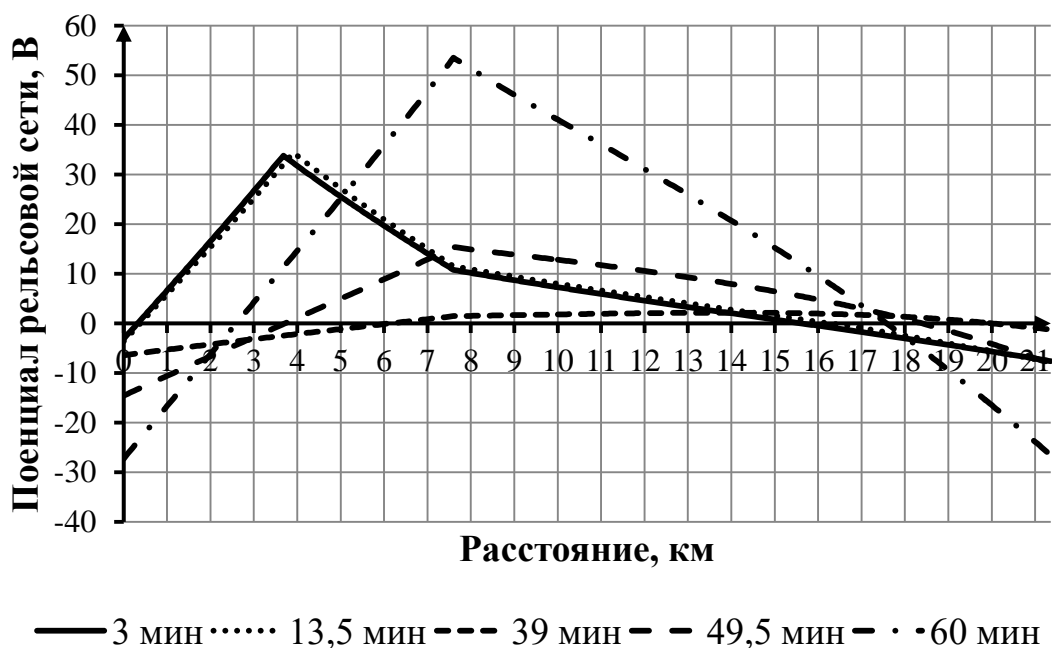


Рисунок Б.6 – Распределение потенциалов рельсов четного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением заземляющего провода

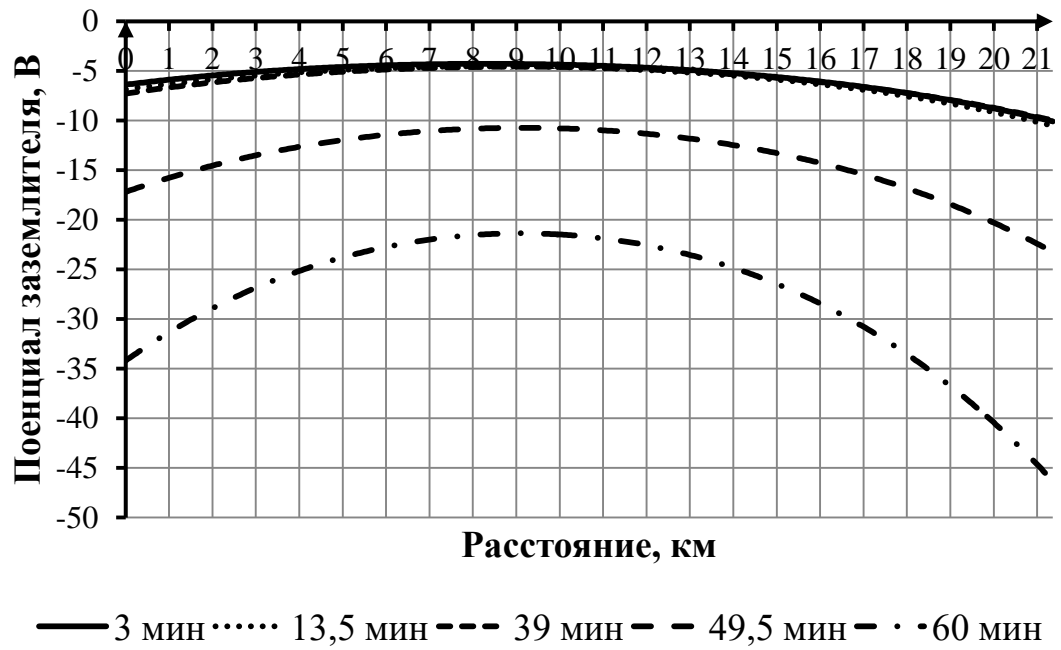


Рисунок Б.7 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением заземляющего провода

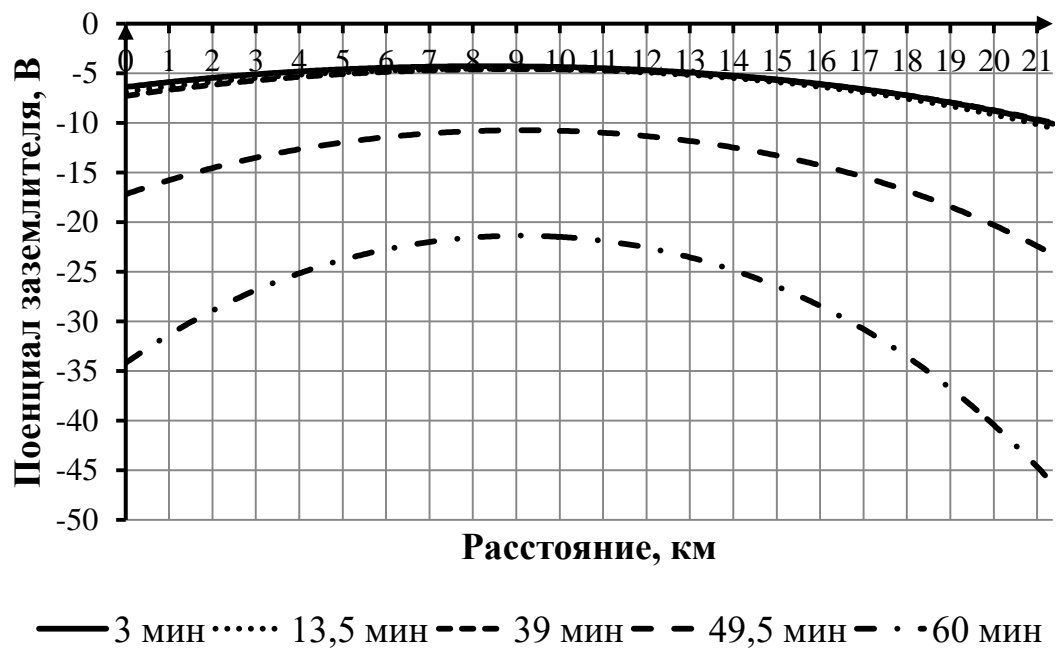


Рисунок Б.8 – Распределение потенциалов заземлителя четного пути вдоль рассматриваемого участка для варианта с применением заземляющего провода

ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ  
«РЕЛЬСЫ–ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ» ОТНОСИТЕЛЬНО  
УДАЛЕННОЙ ЗЕМЛИ ОТ КООРДИНАТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ  
КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ  
УСТРОЙСТВ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

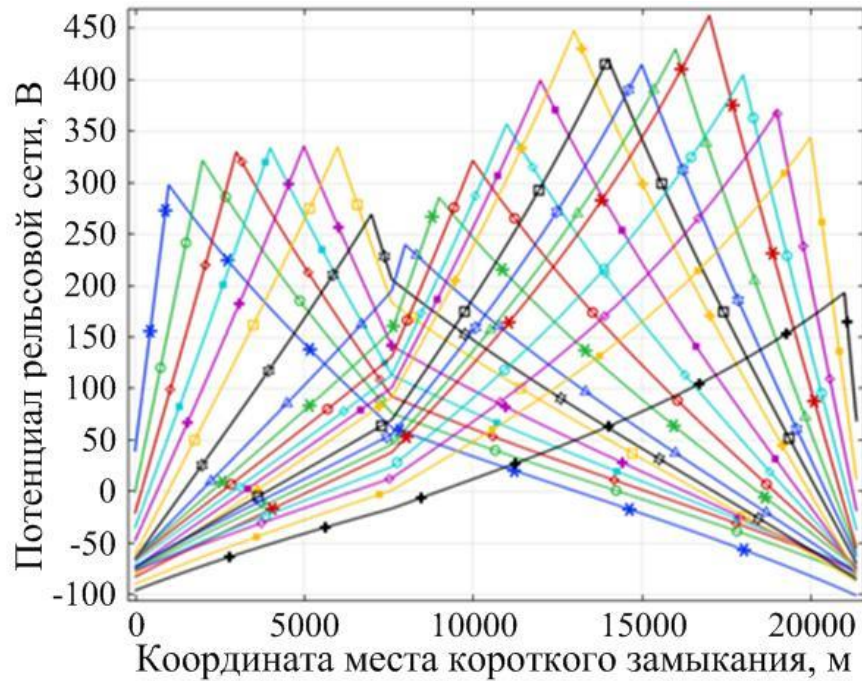


Рисунок В.1 – Распределение потенциалов рельсовой сети нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением комбинированного заземлителя

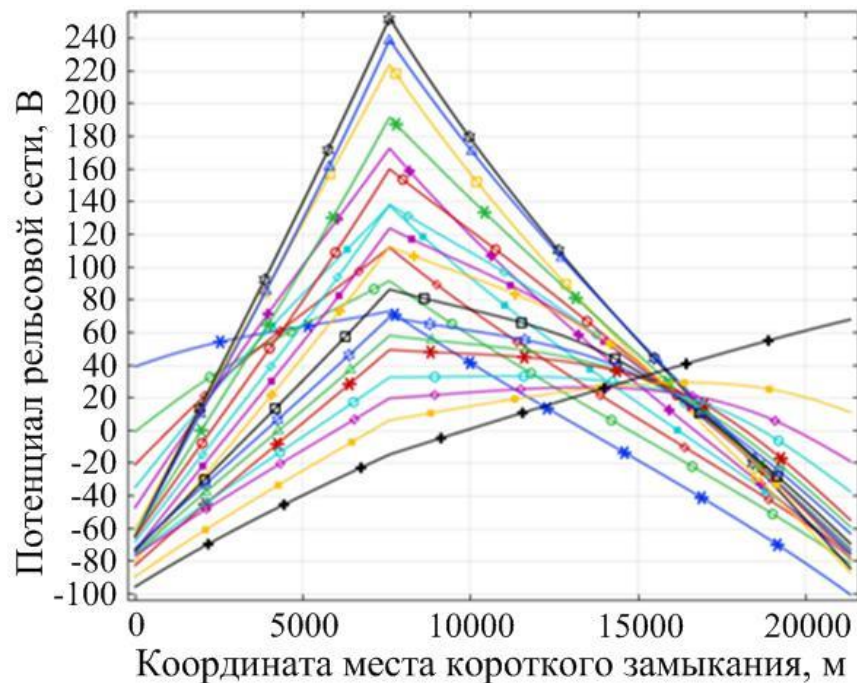


Рисунок В.2 – Распределение потенциалов рельсовой сети четного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением комбинированного заземлителя



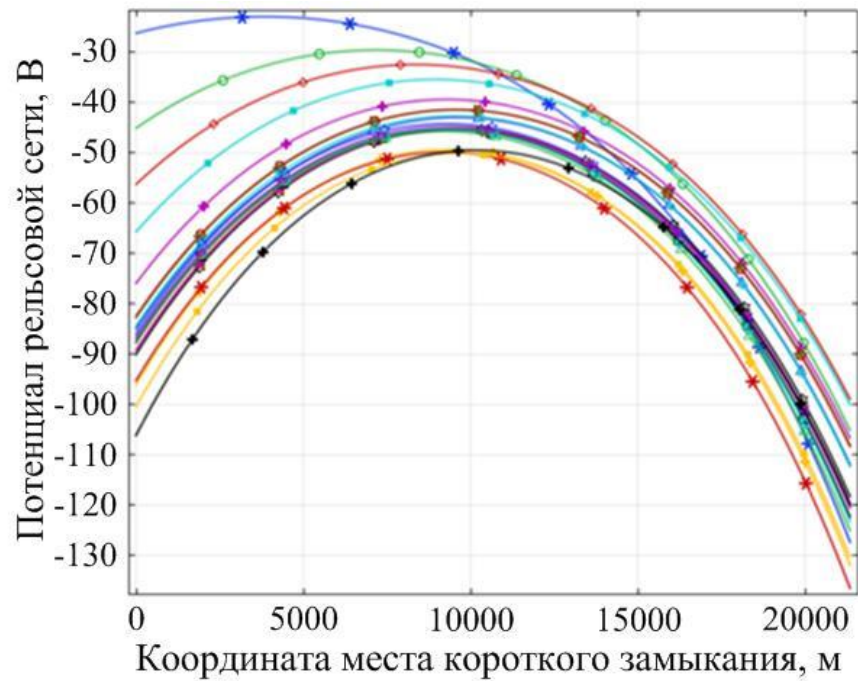


Рисунок В.3 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением комбинированного заземлителя

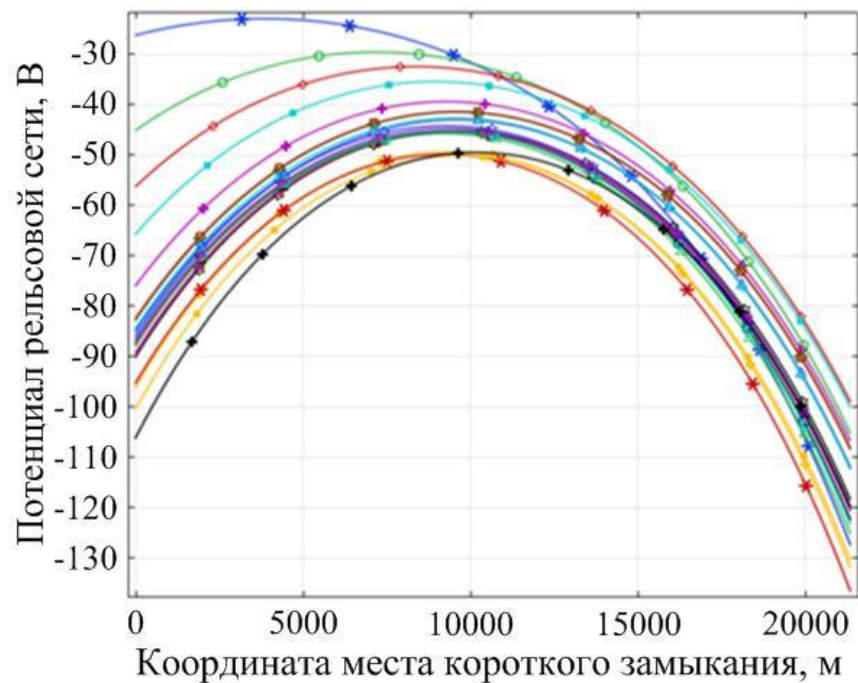


Рисунок В.4 – Распределение потенциалов заземлителя четного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением комбинированного заземлителя

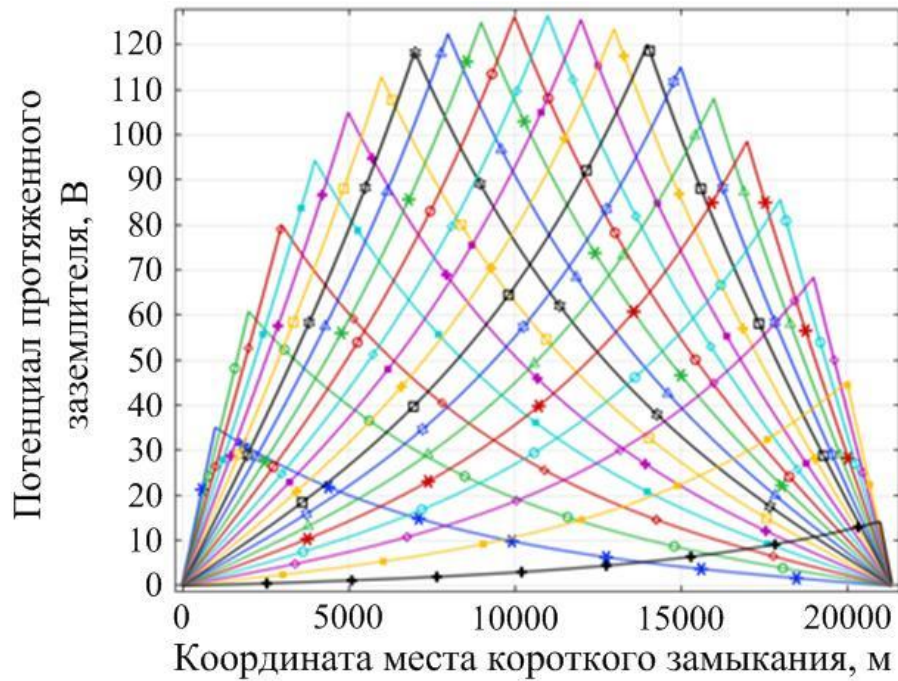


Рисунок В.5 – Распределение потенциала заземлителя нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на протяженное заземляющее устройство нечетного пути при сопротивлении в цепи замыкания 100 Ом для варианта с применением комбинированного заземлителя

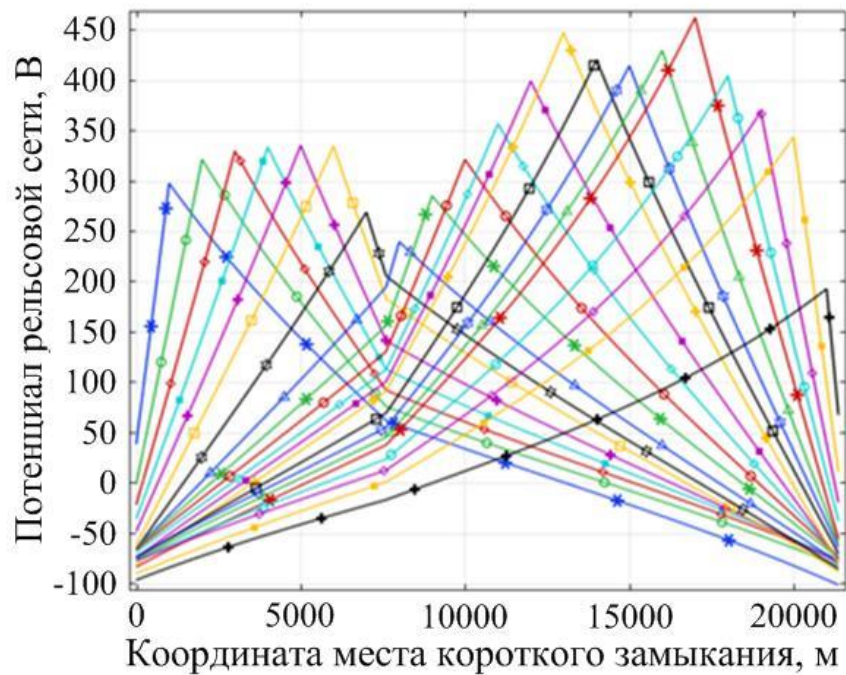


Рисунок В.6 – Распределение потенциалов рельсовой сети нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением заземляющего провода

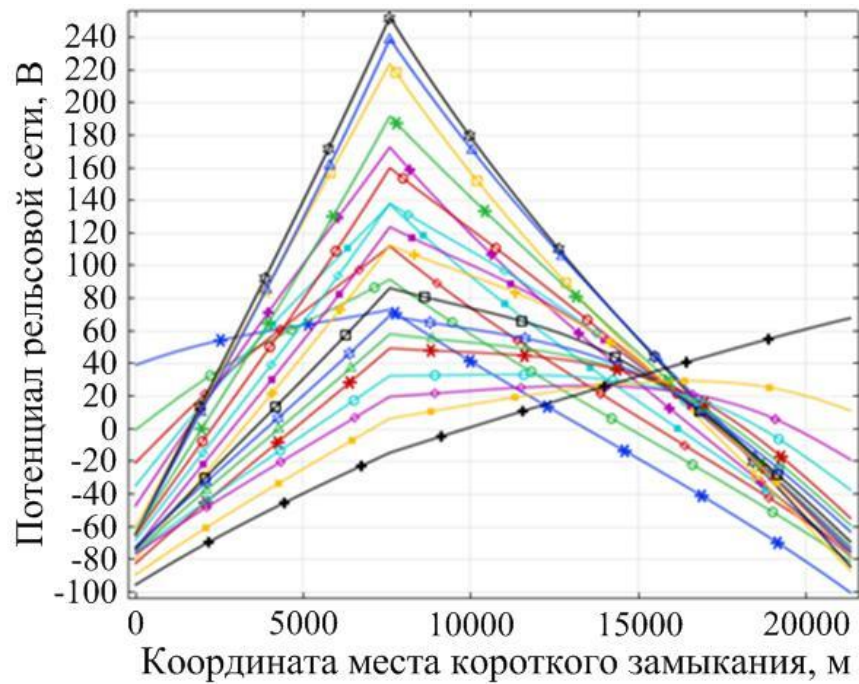


Рисунок В.7 – Распределение потенциалов рельсовой сети четного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением заземляющего провода

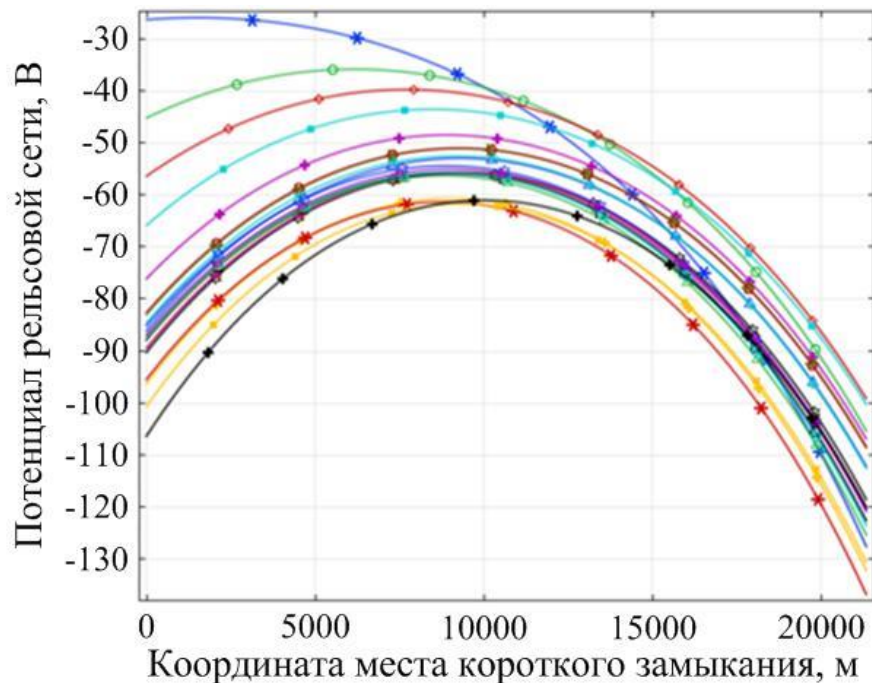


Рисунок В.8 – Распределение потенциалов заземлителя нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением заземляющего провода



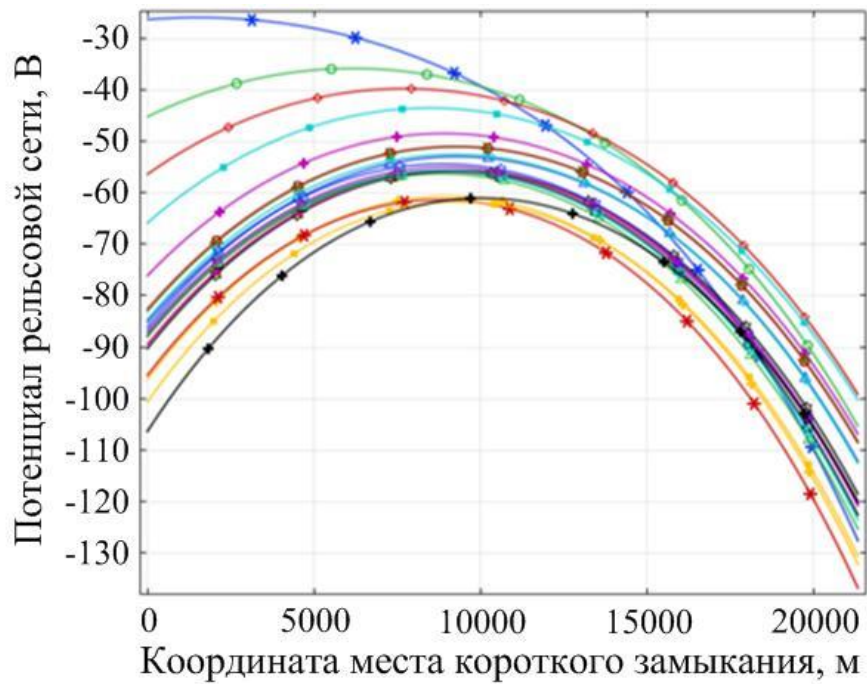


Рисунок В.9 – Распределение потенциалов заземлителя четного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на рельсовую сеть нечетного пути для варианта с применением заземляющего провода

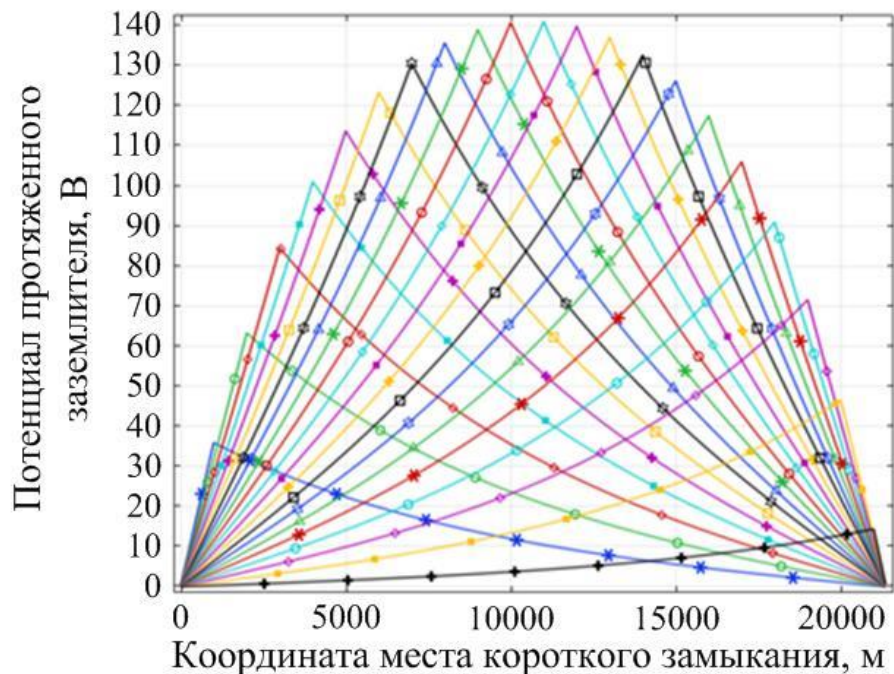


Рисунок В.10 – Распределение потенциала заземлителя нечетного пути при различных местах короткого замыкания контактной сети нечетного пути на протяженное заземляющее устройство нечетного пути при сопротивлении в цепи замыкания 100 Ом для варианта с применением заземляющего провода

ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ  
«РЕЛЬСЫ–ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ» ОТНОСИТЕЛЬНО  
УДАЛЕННОЙ ЗЕМЛИ ОТ ВРЕМЕНИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ  
КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО  
ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

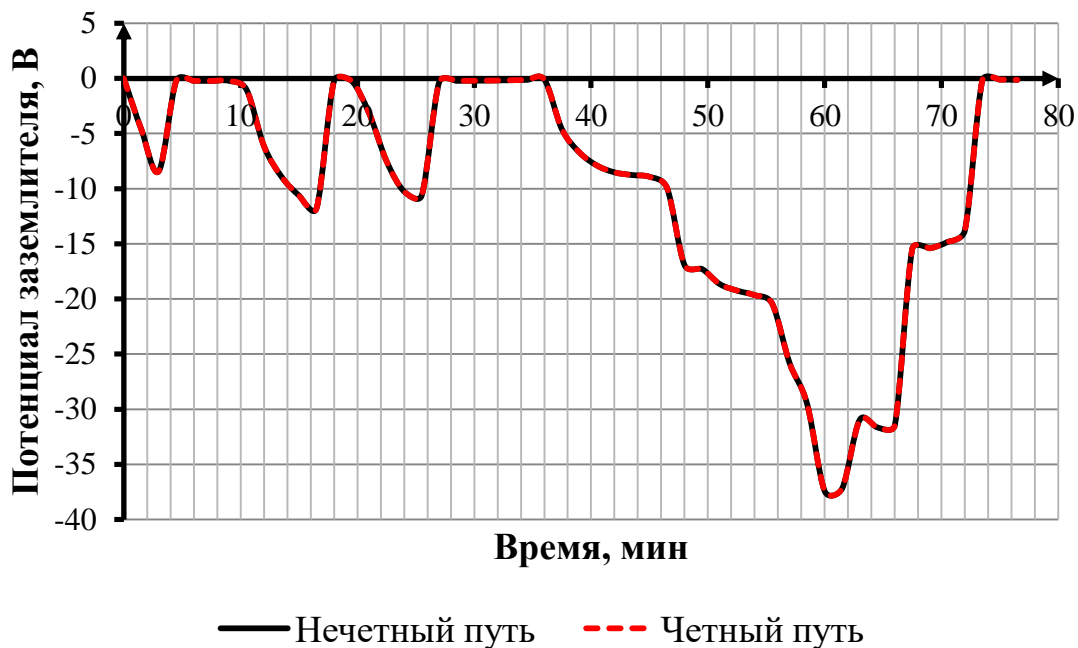


Рисунок Г.1 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

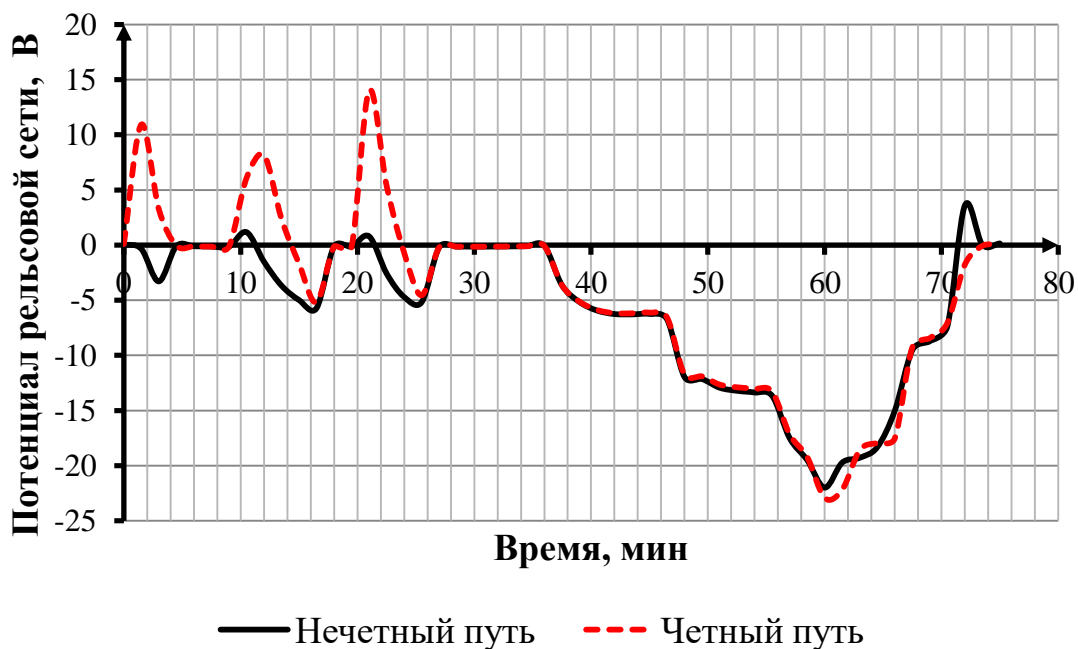


Рисунок Г.2 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

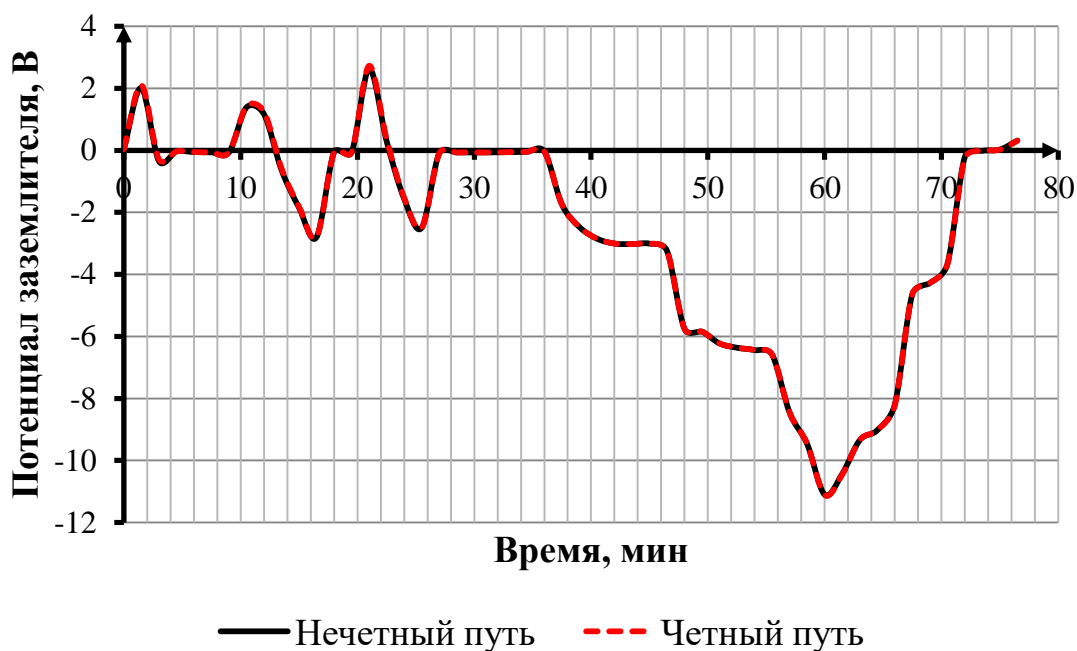


Рисунок Г.3 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

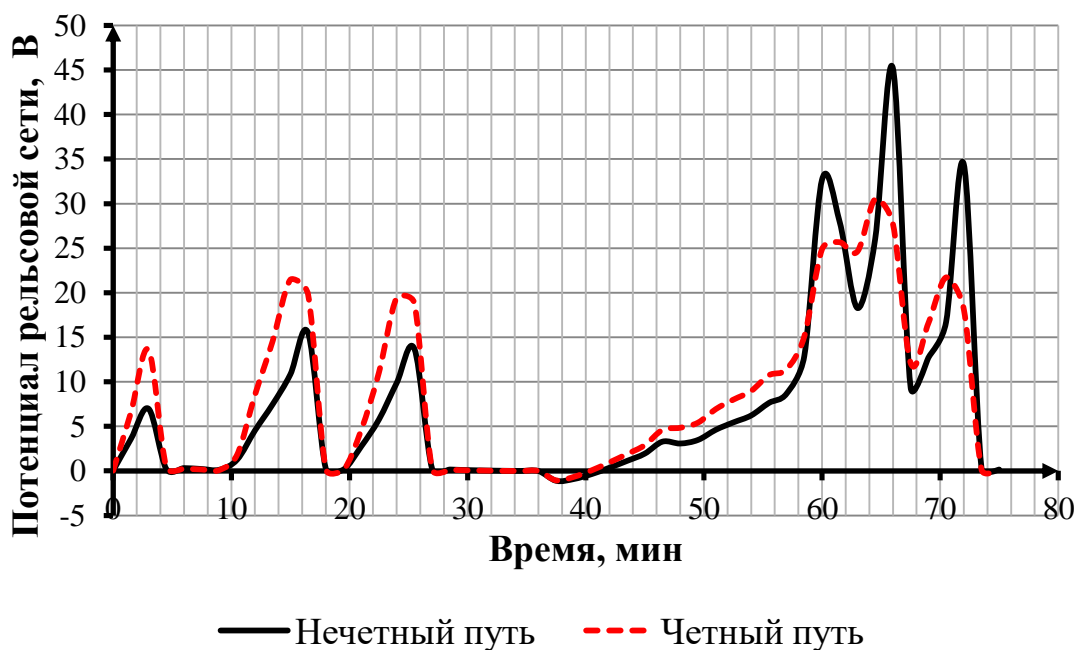


Рисунок Г.4 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

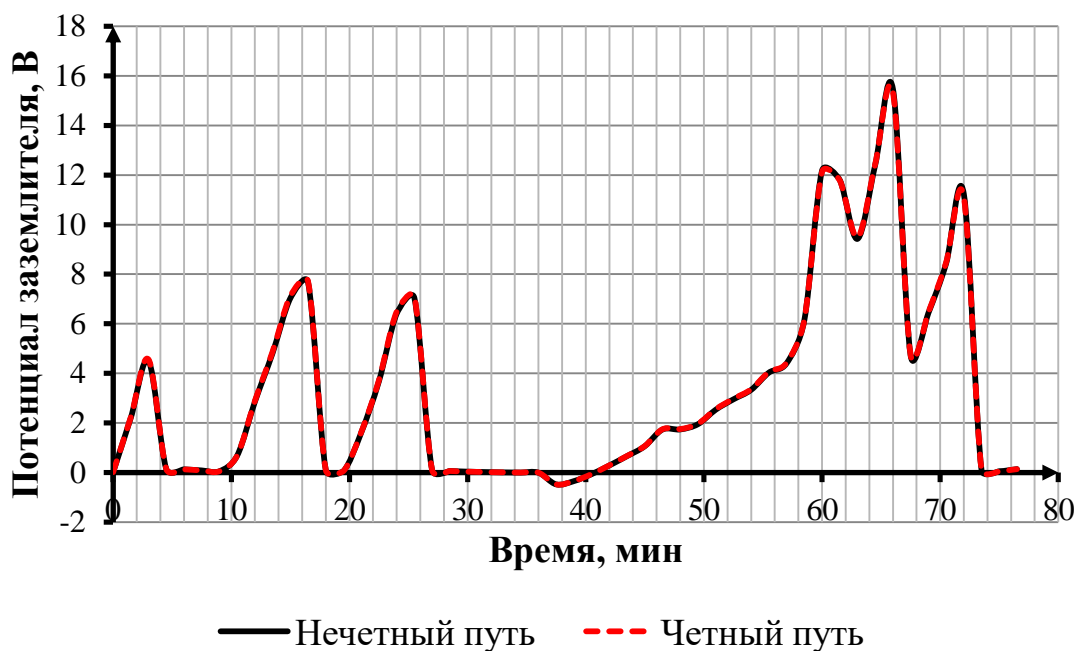


Рисунок Г.5 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

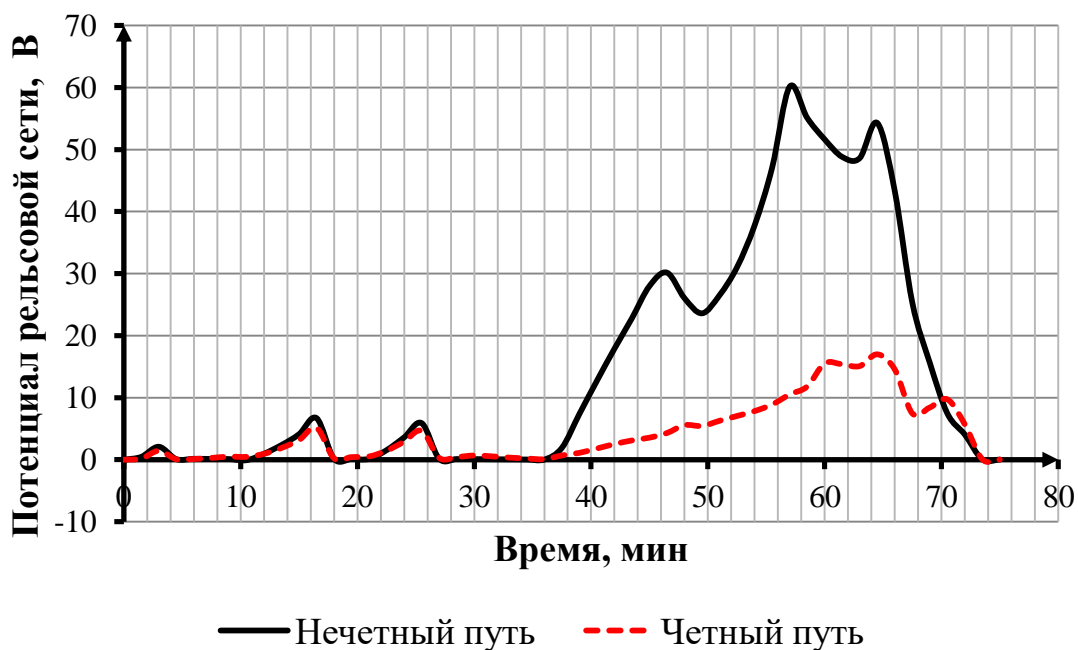


Рисунок Г.6 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода



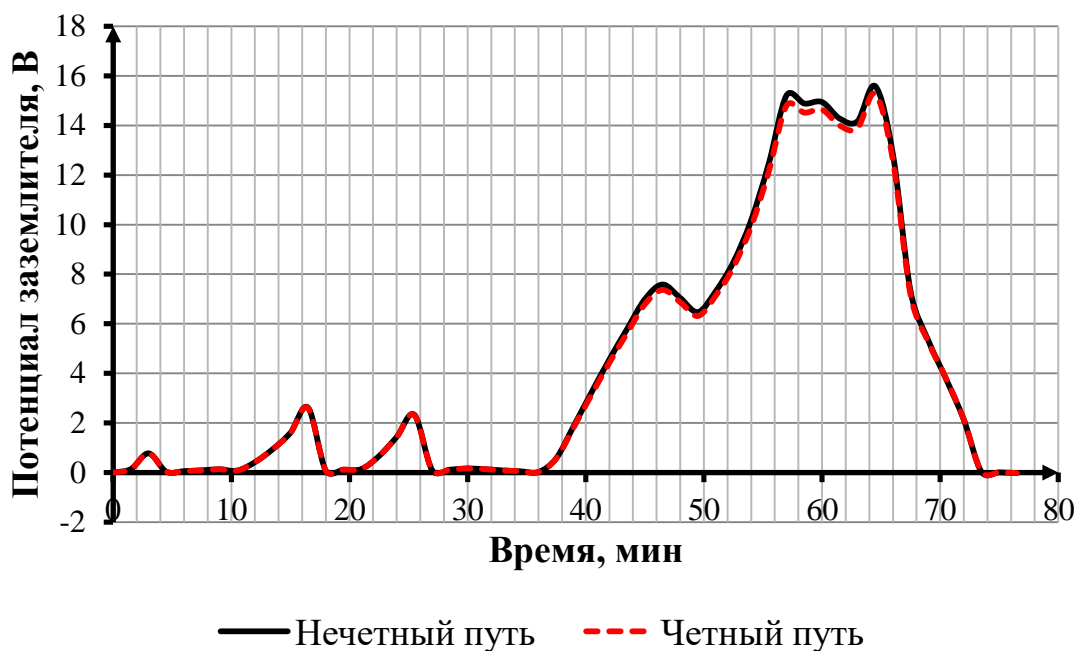


Рисунок Г.7 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

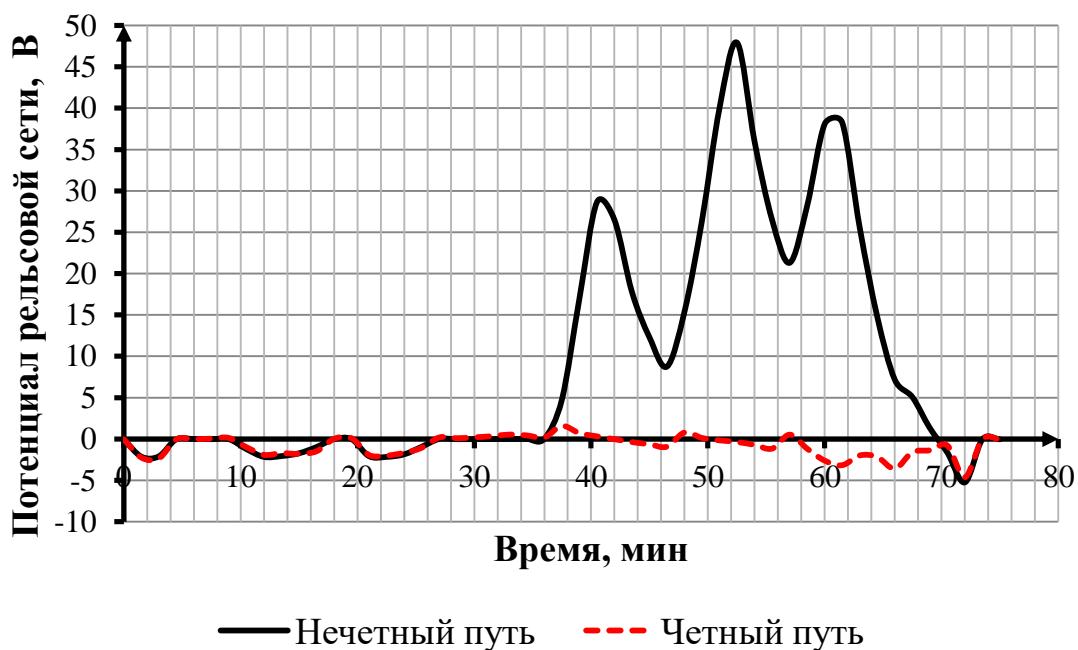


Рисунок Г.8 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

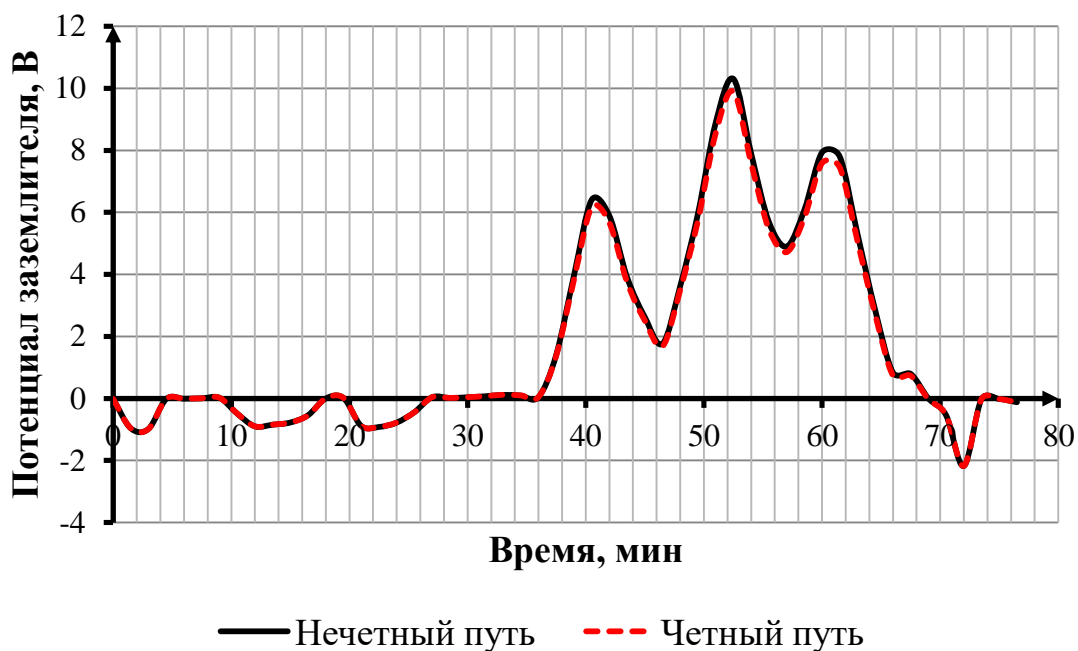


Рисунок Г.9 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

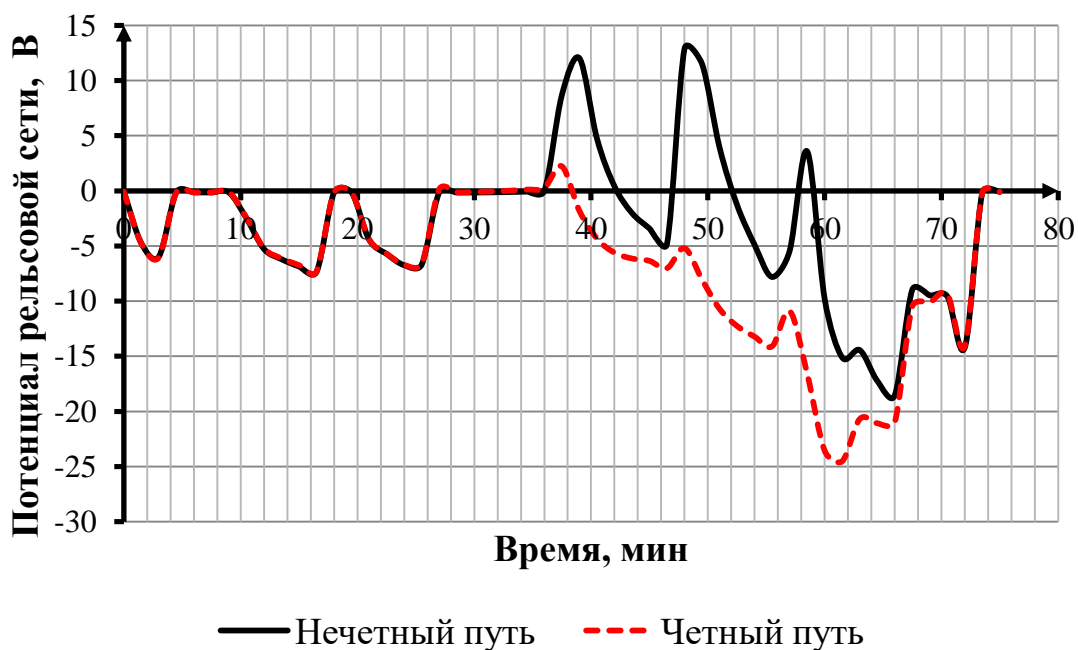


Рисунок Г.10 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

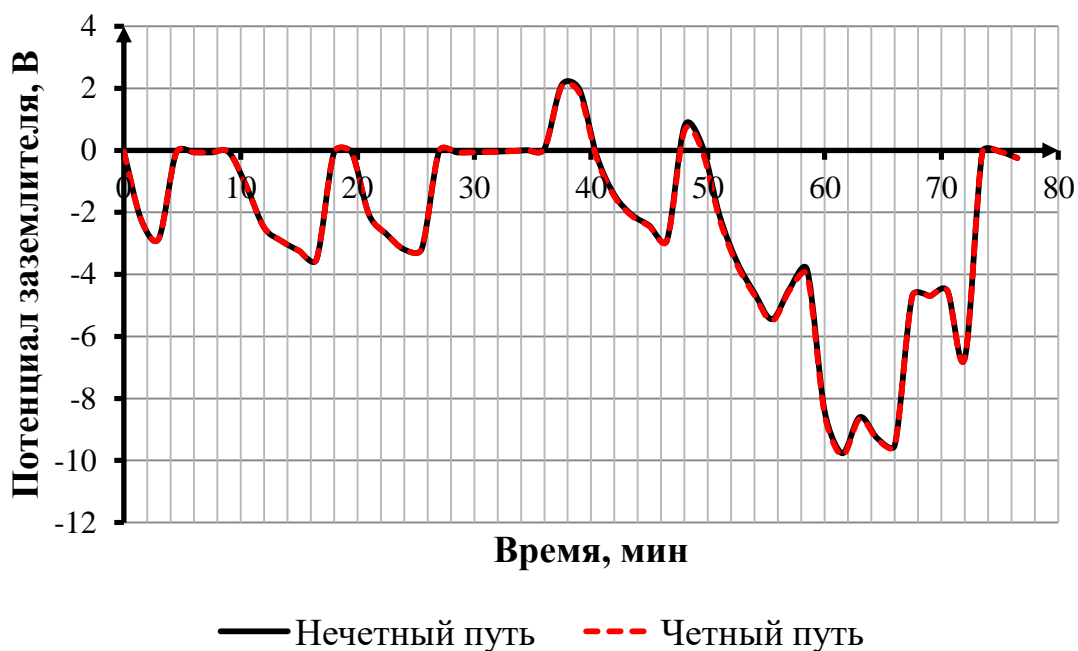


Рисунок Г.11 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

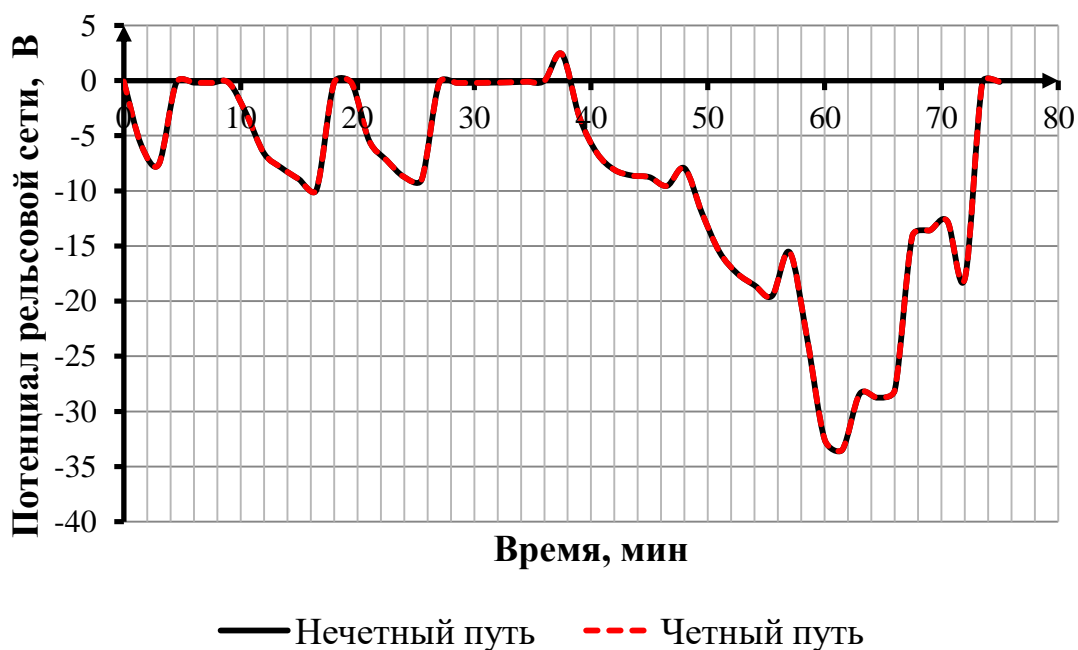


Рисунок Г.12 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

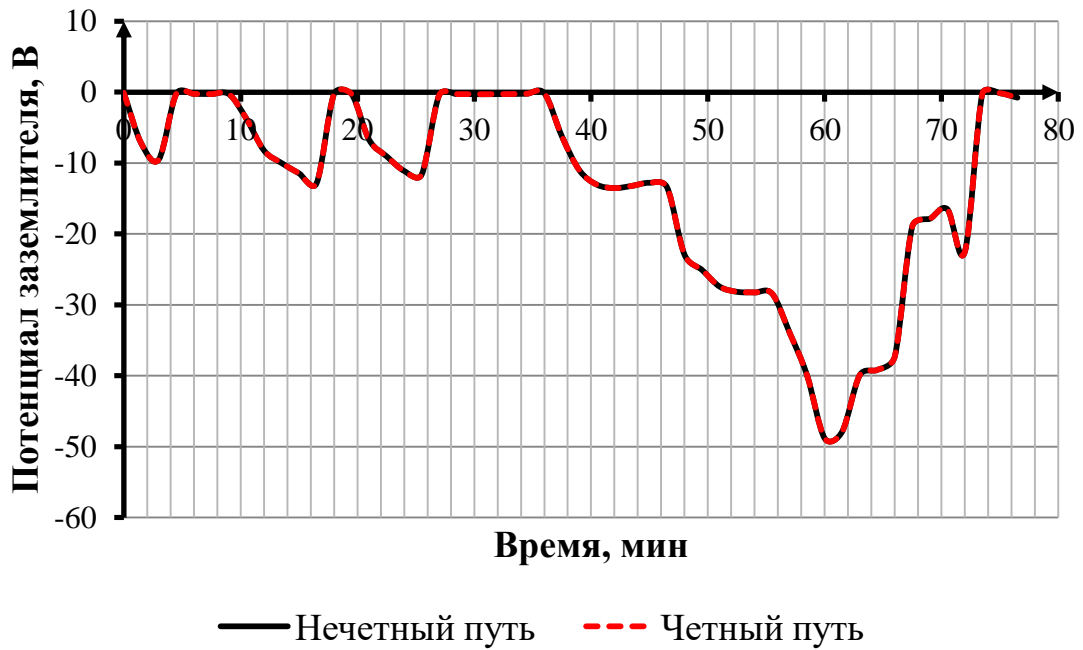


Рисунок Г.13 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с применением горизонтального заземляющего электрода

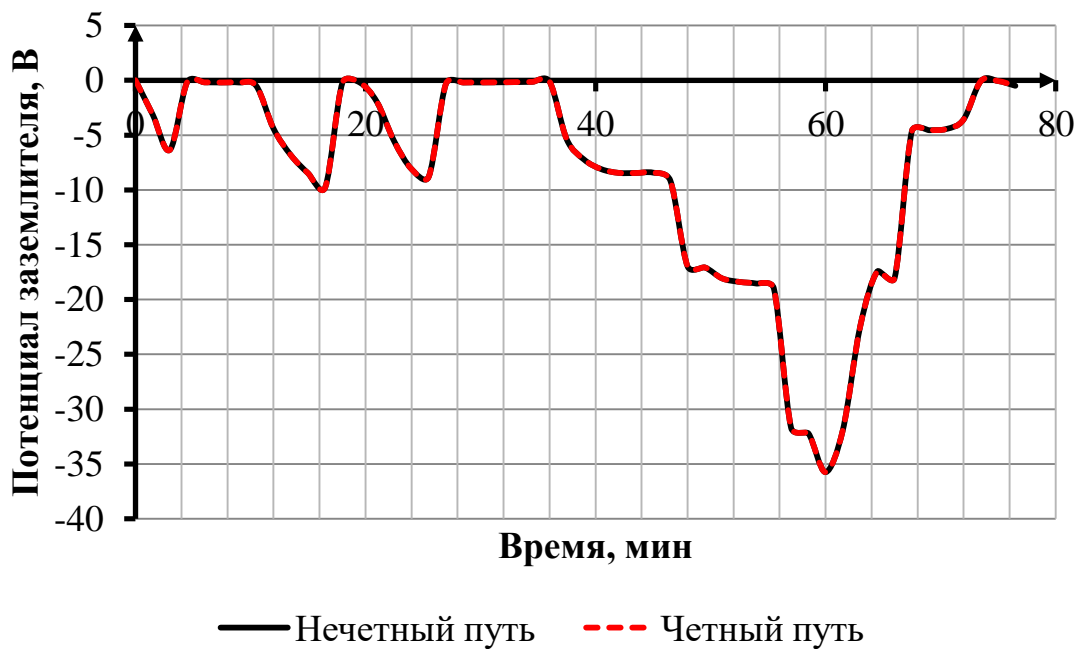


Рисунок Г.14 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

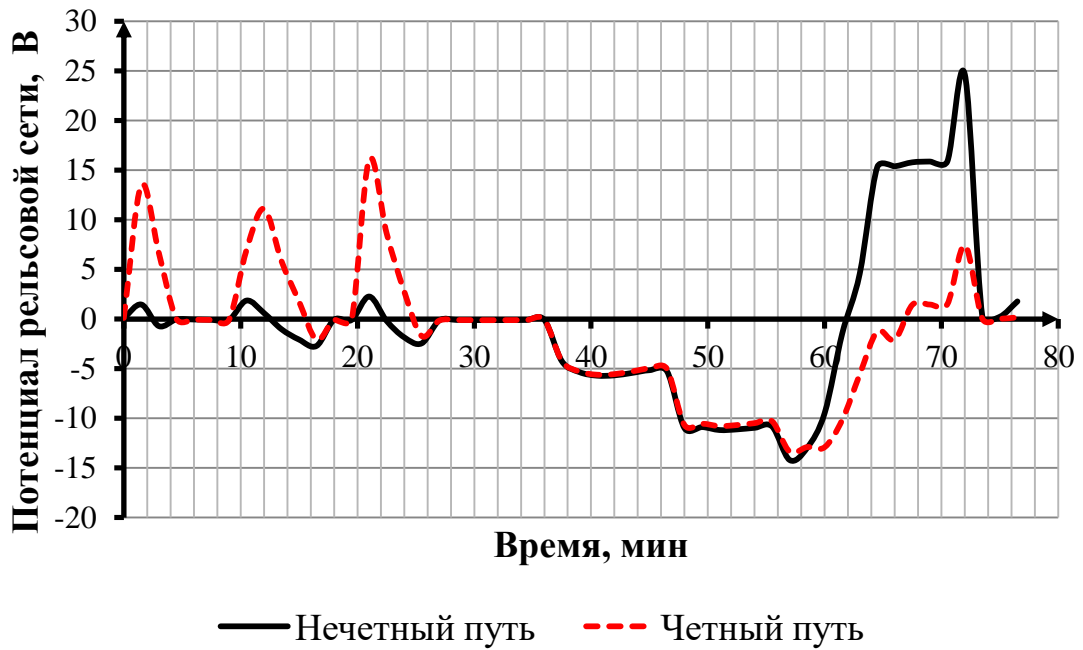


Рисунок Г.15 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

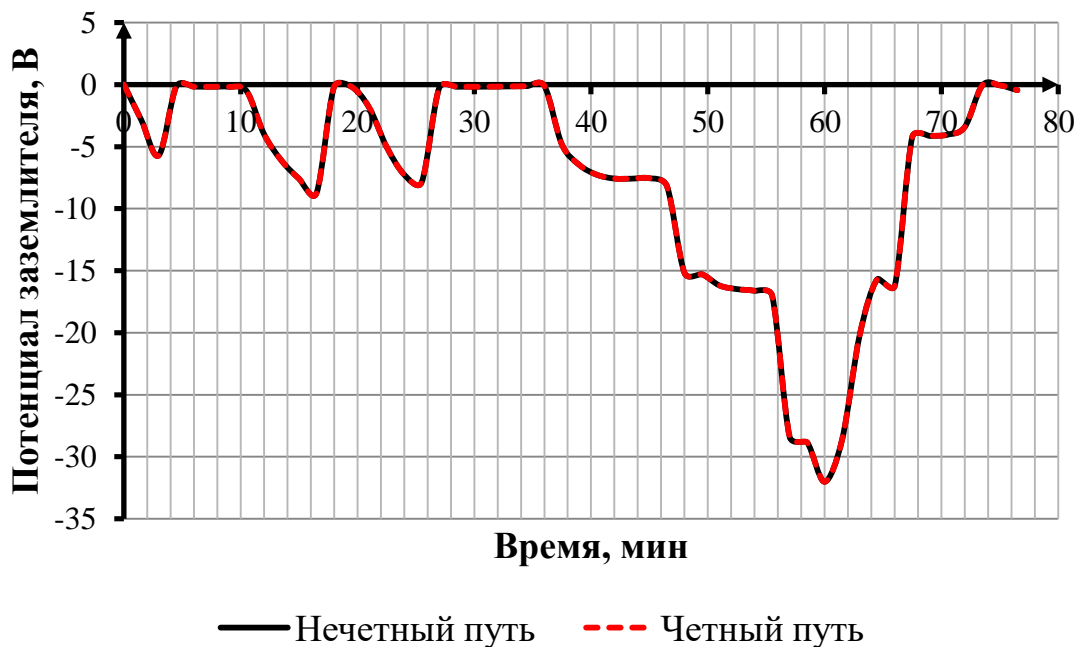


Рисунок Г.16 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

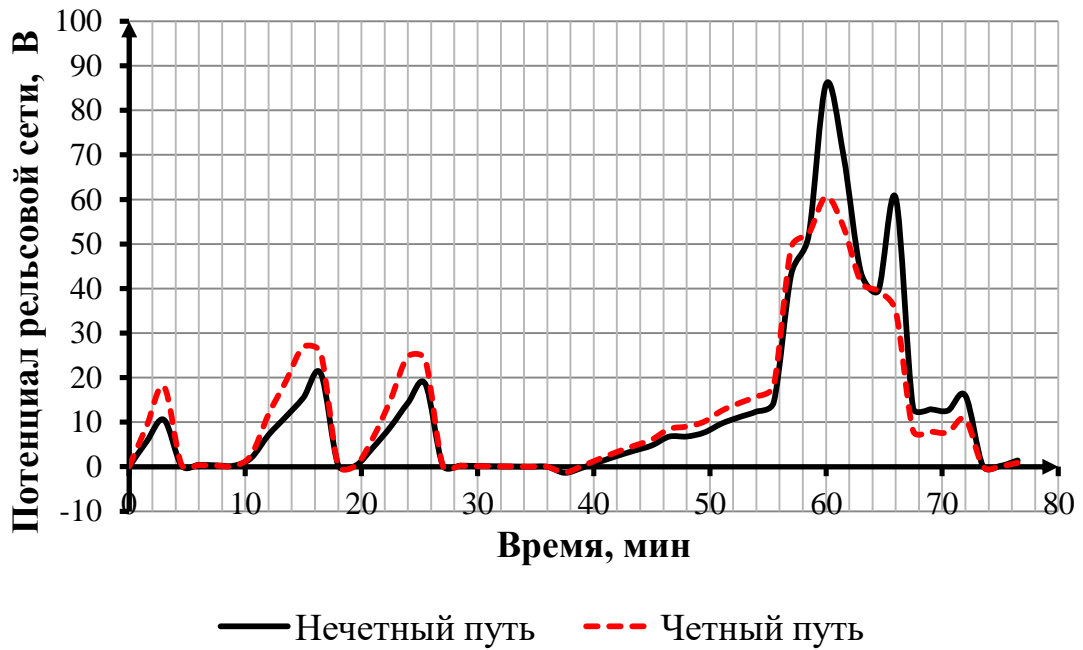


Рисунок Г.17 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

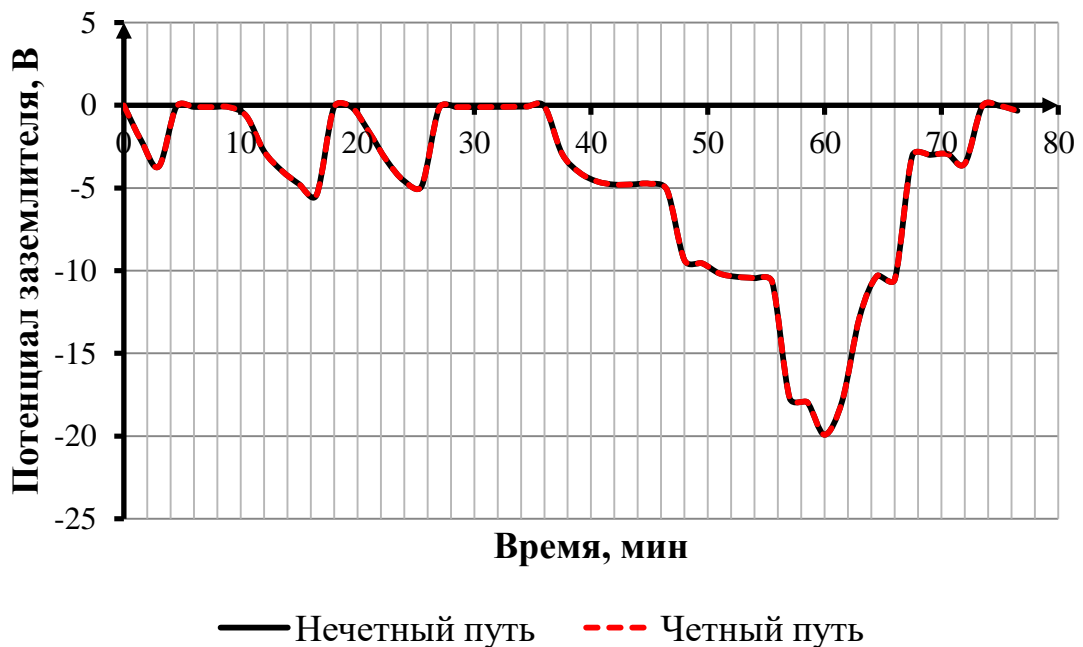


Рисунок Г.18 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

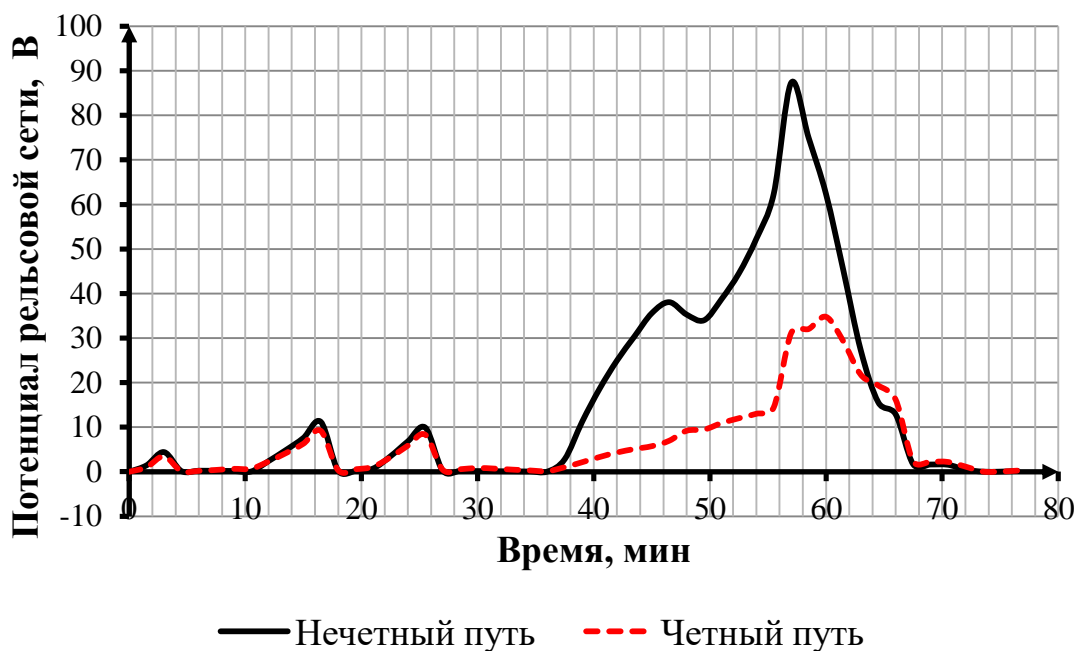


Рисунок Г.19 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

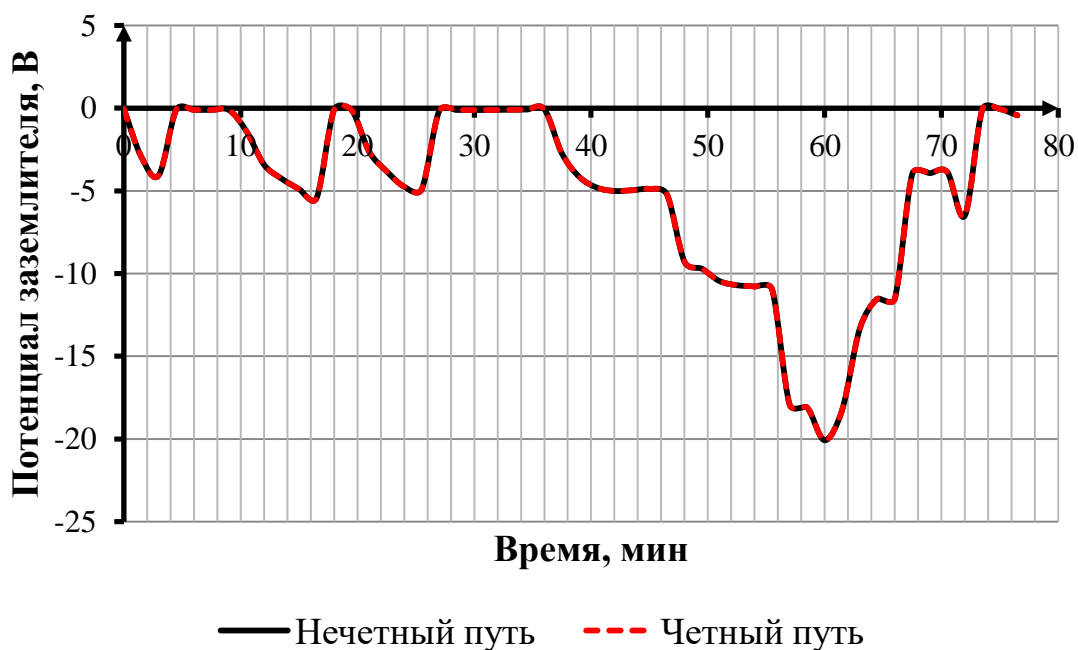


Рисунок Г.20 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

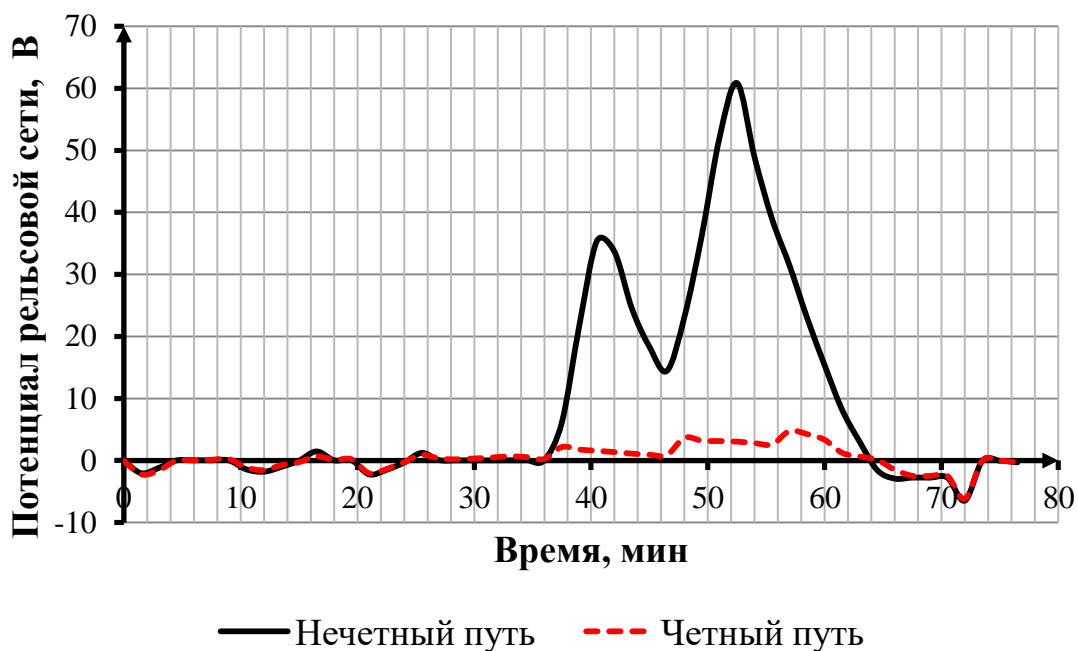


Рисунок Г.21 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

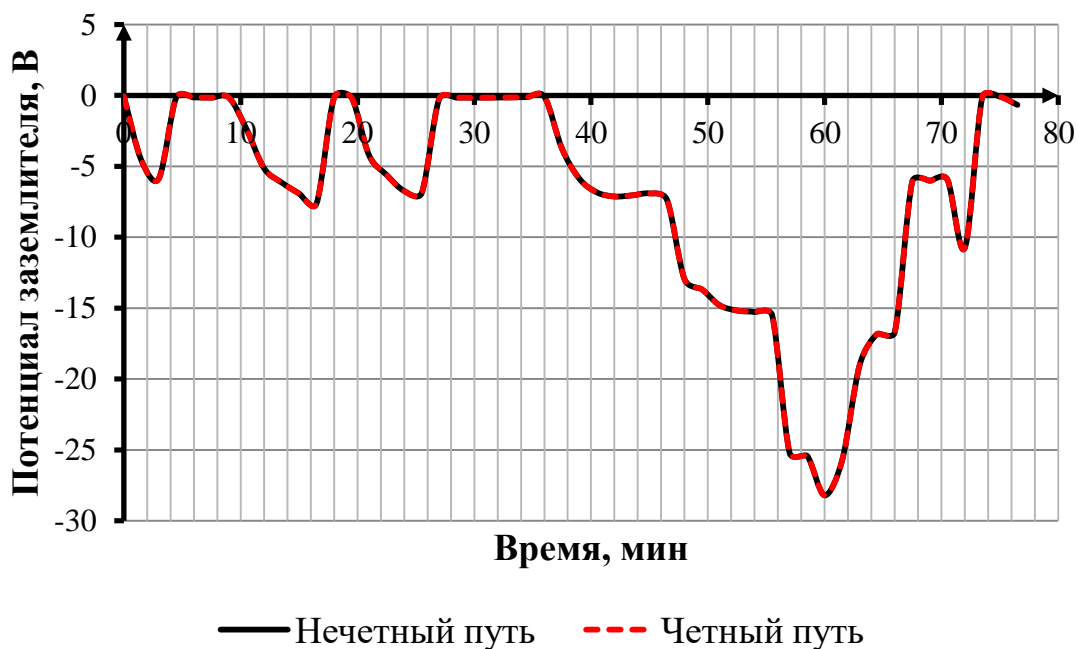


Рисунок Г.22 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



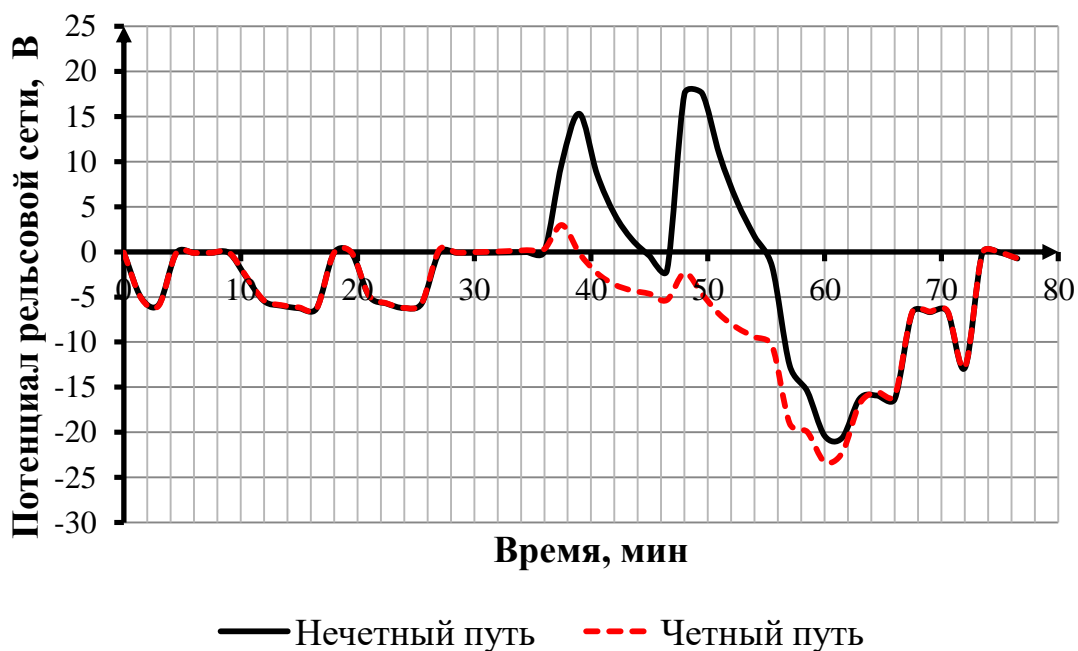


Рисунок Г.23 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

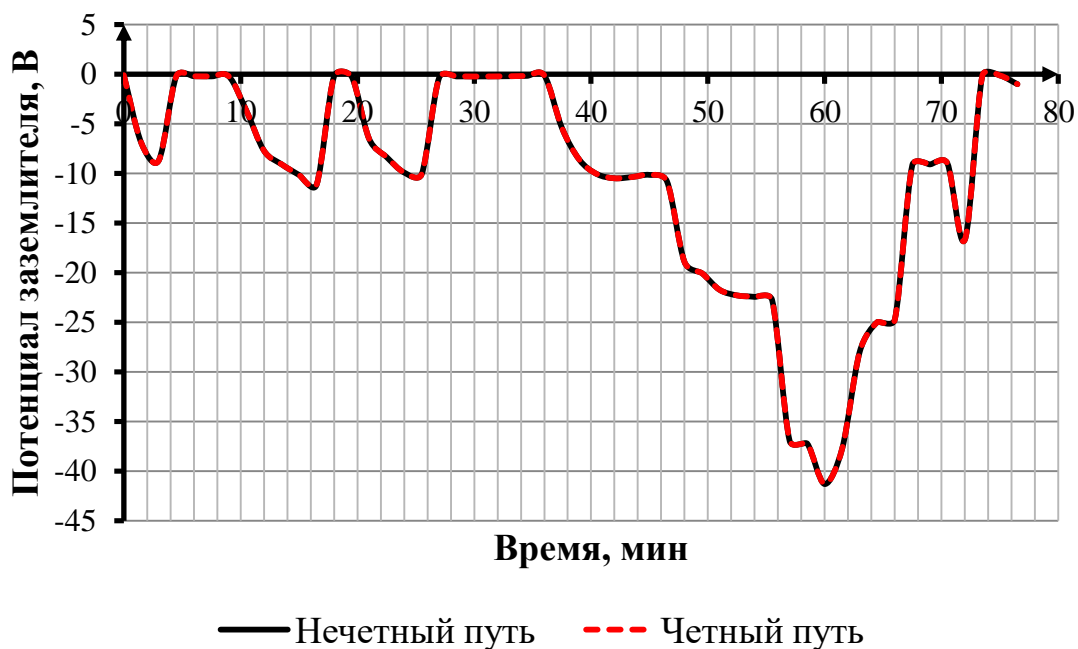


Рисунок Г.24 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

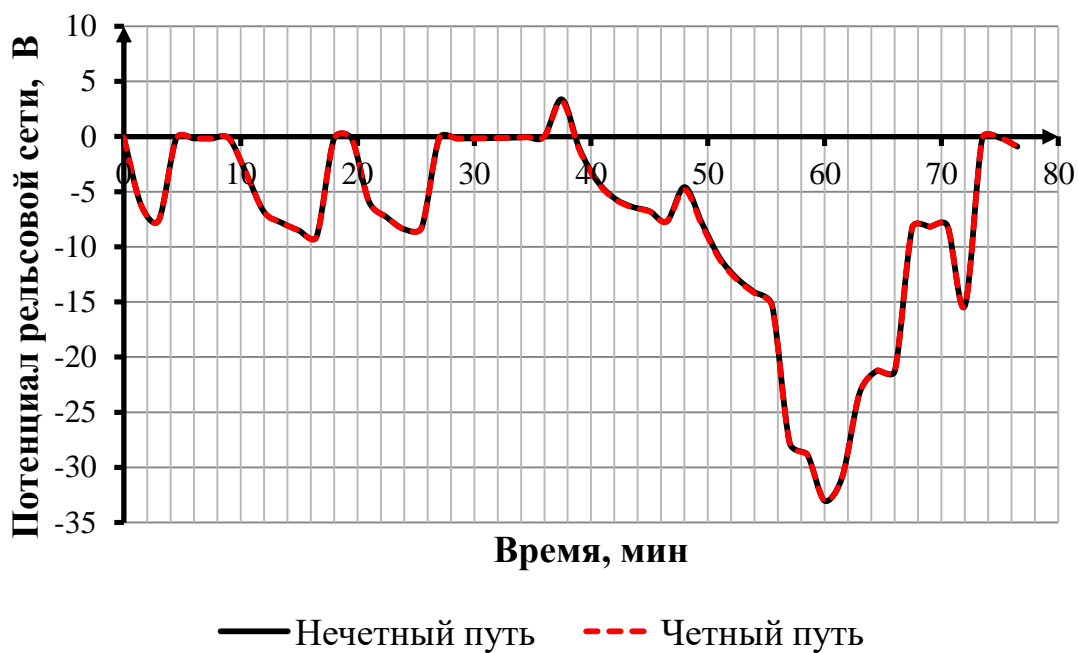


Рисунок Г.25 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

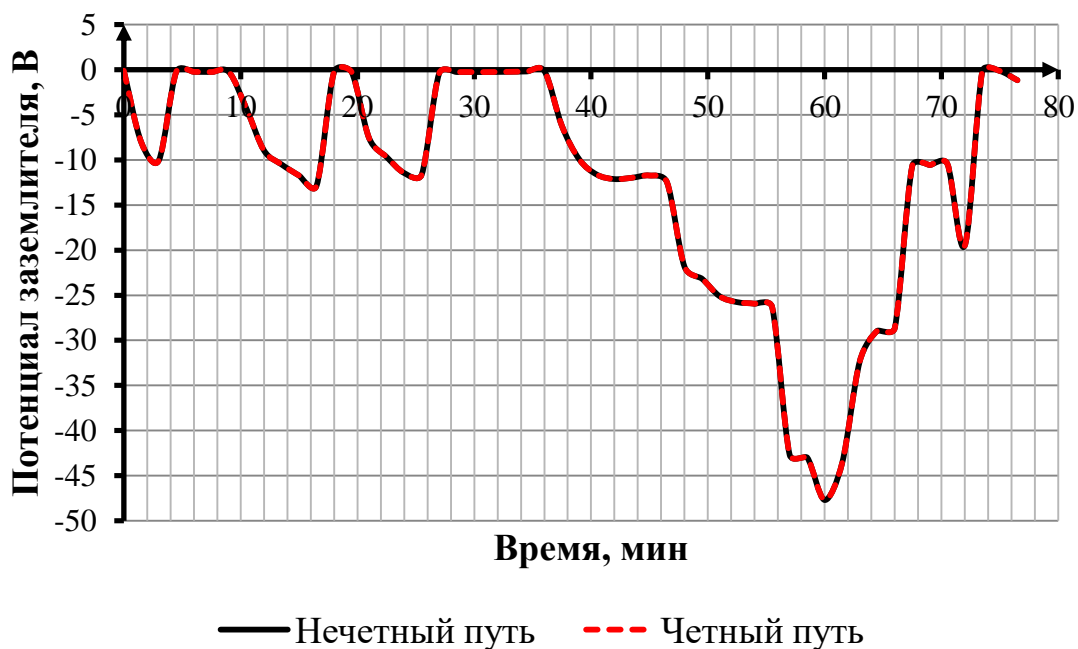


Рисунок Г.26 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

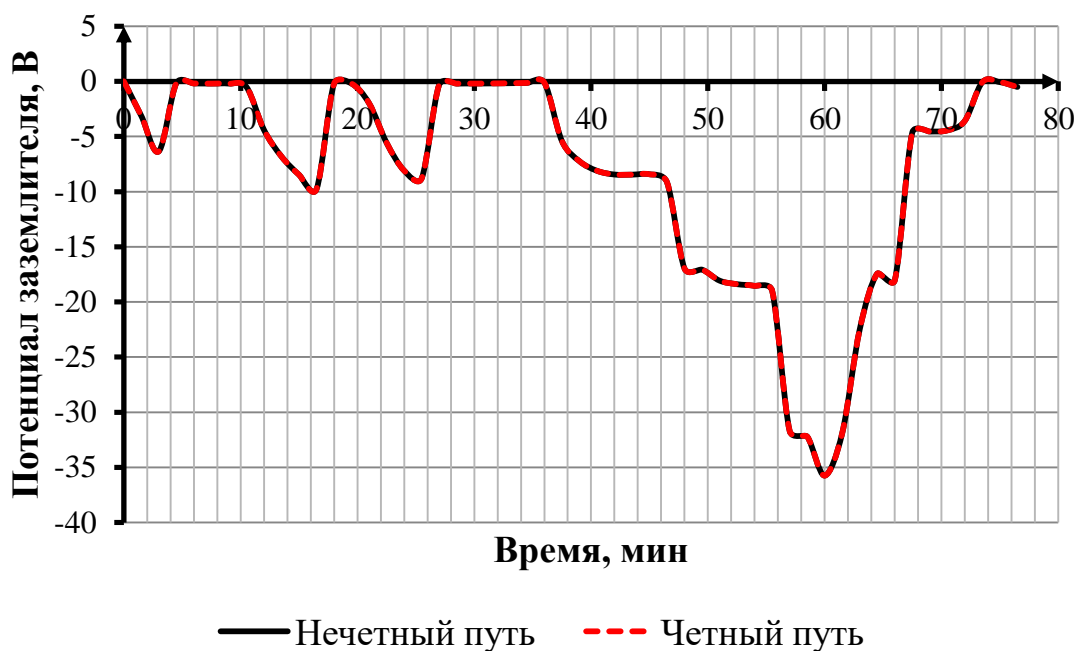


Рисунок Г.27 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

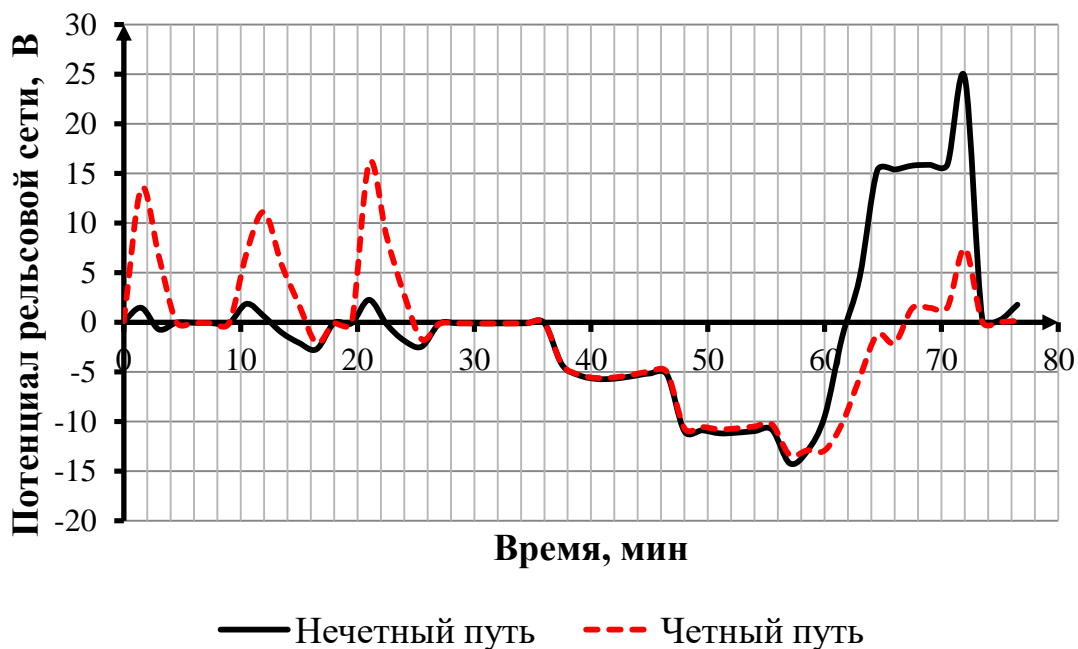


Рисунок Г.28 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

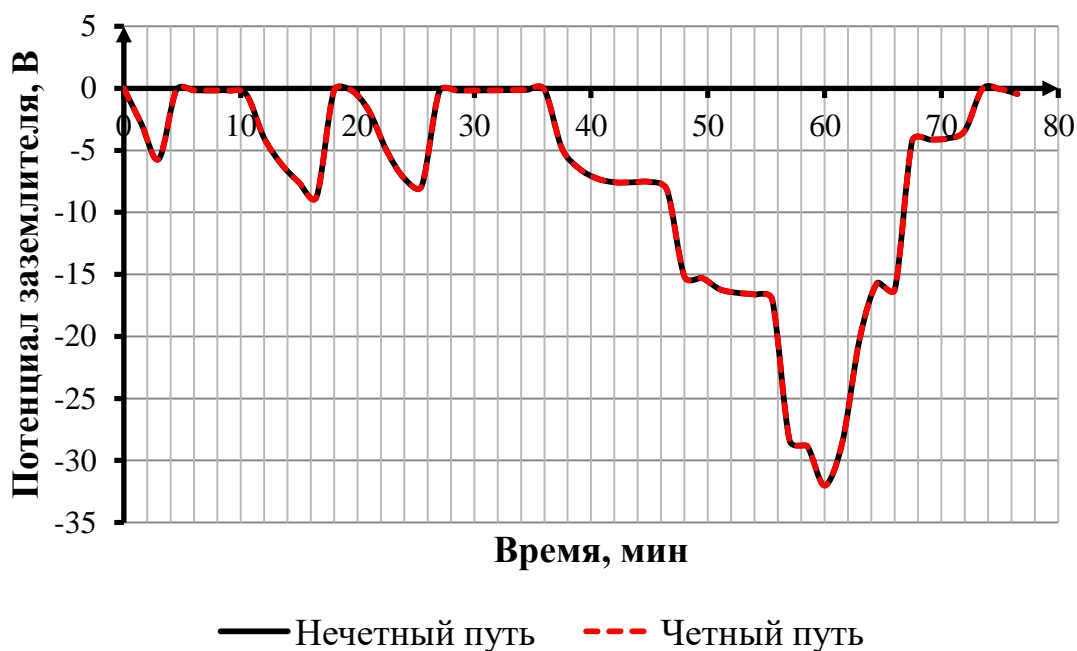


Рисунок Г.29 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

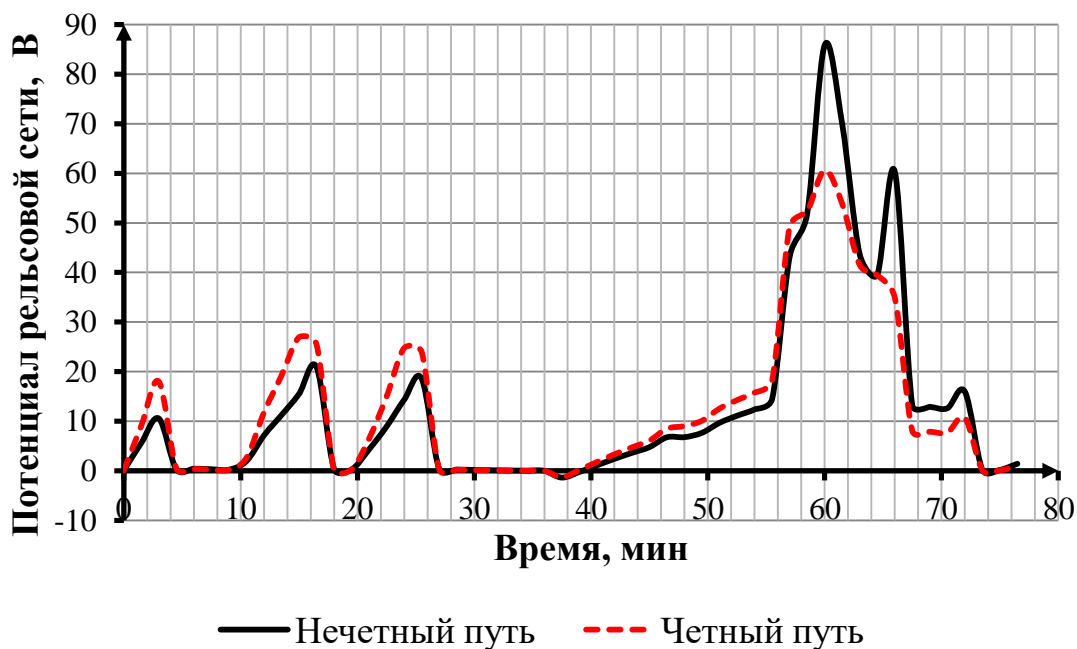


Рисунок Г.30 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

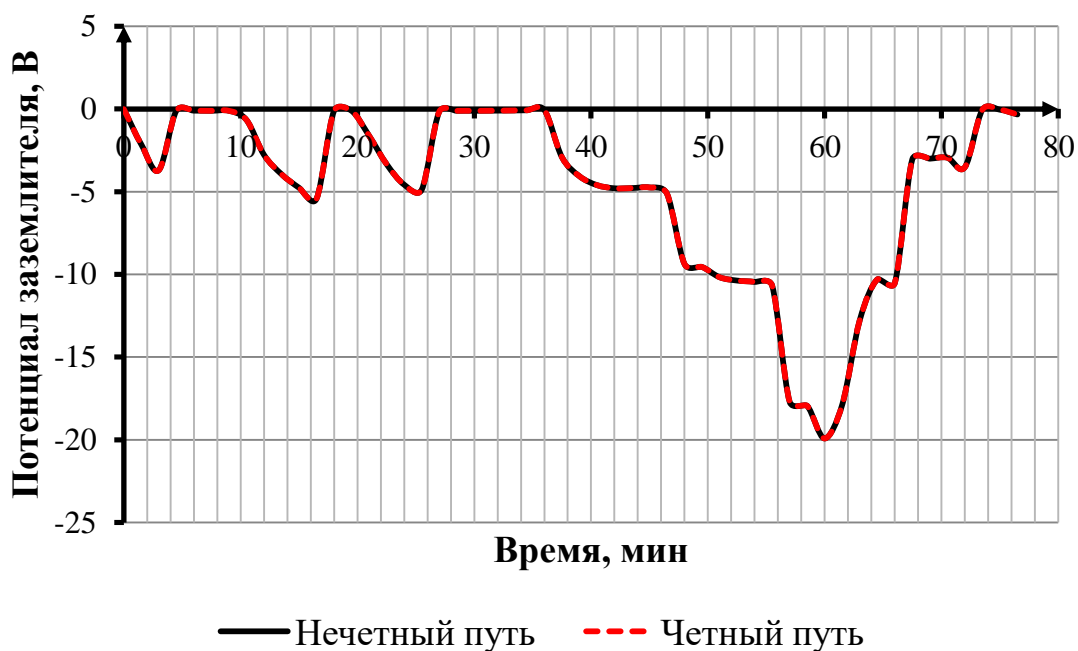


Рисунок Г.31 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

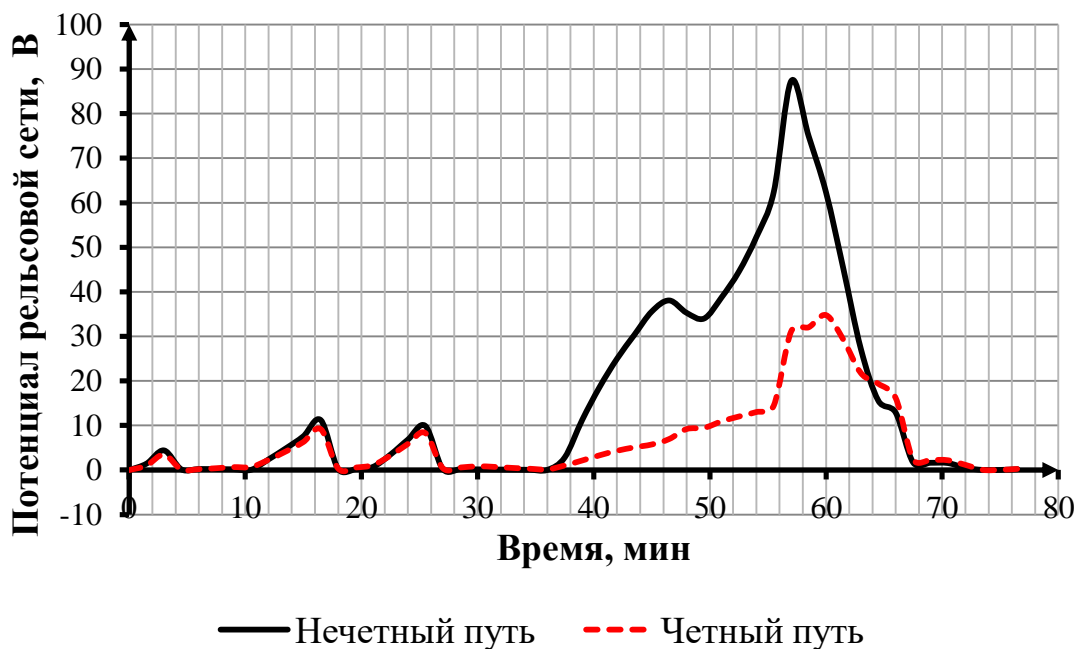


Рисунок Г.32 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

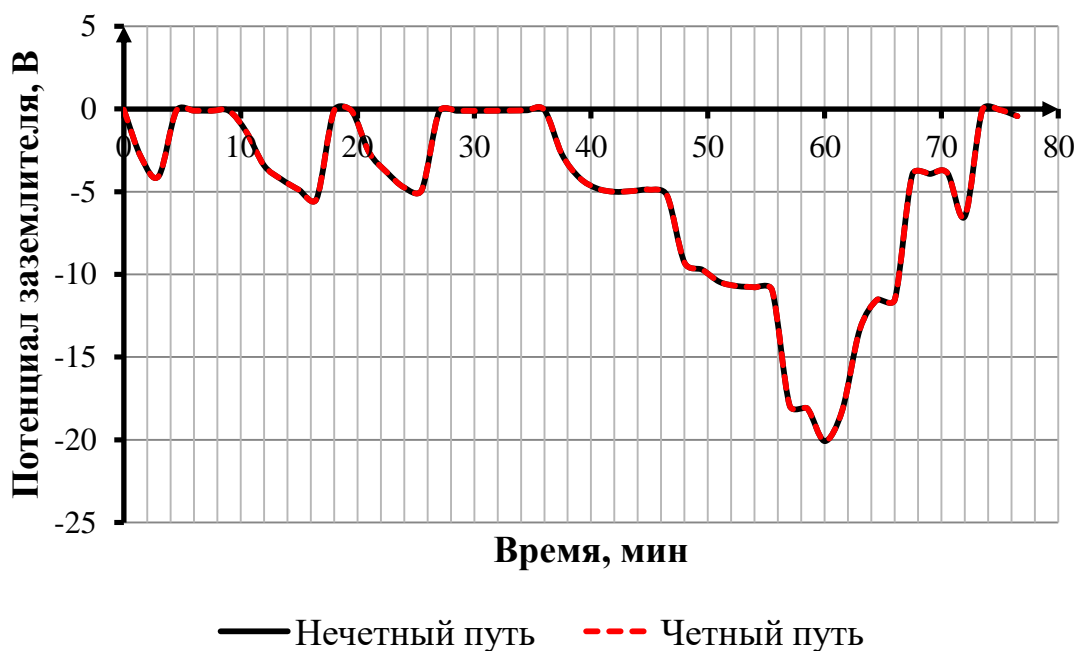


Рисунок Г.33 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

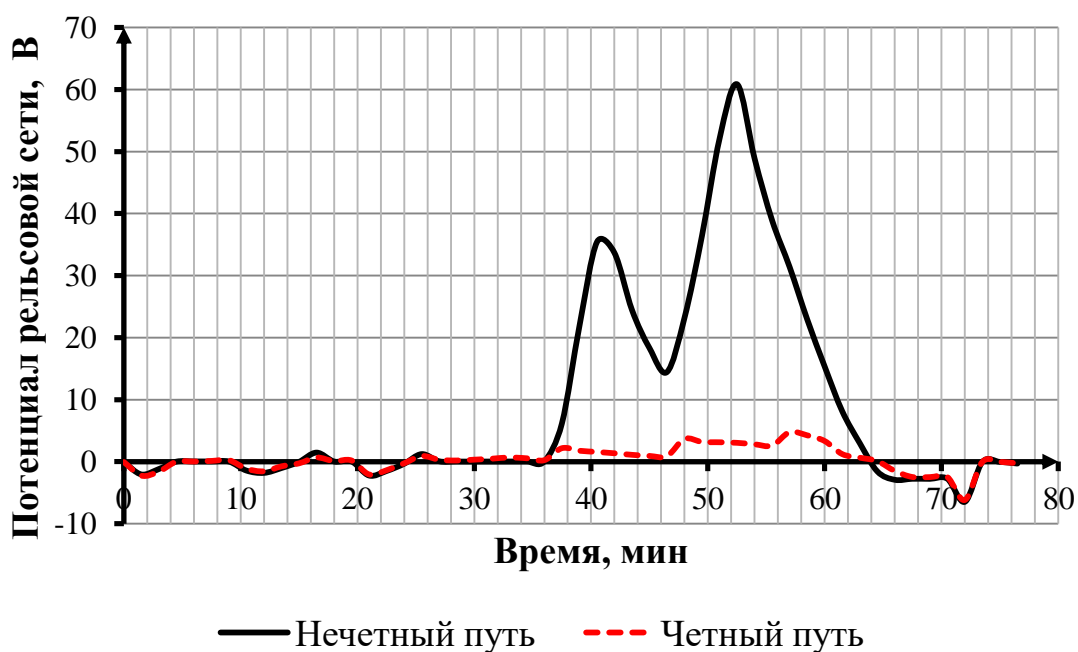


Рисунок Г.34 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

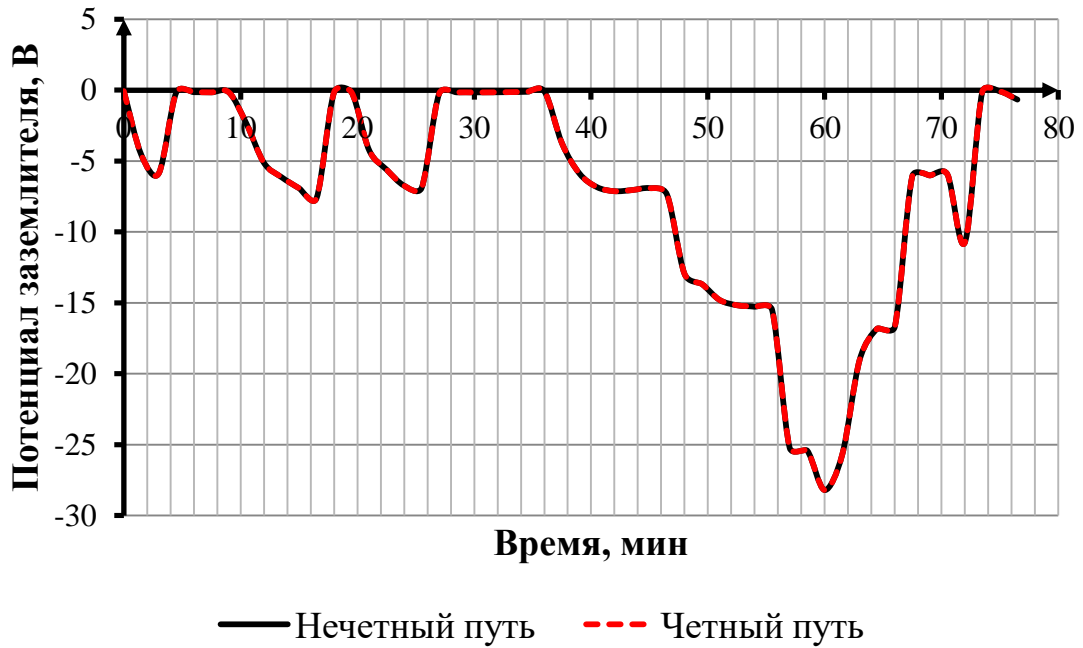


Рисунок Г.35 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

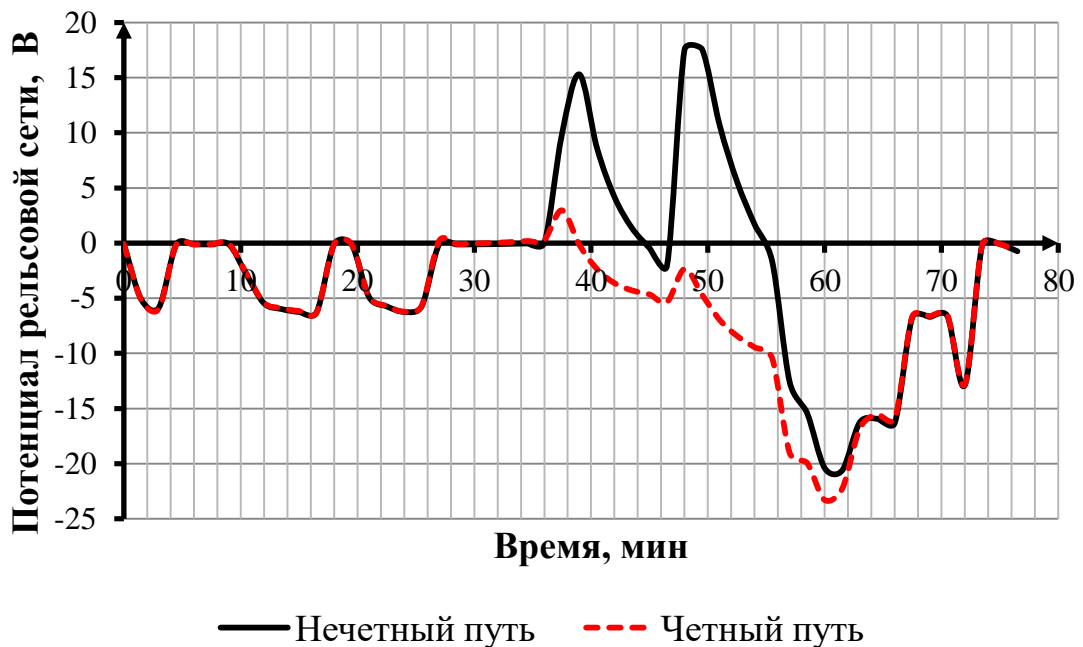


Рисунок Г.36 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

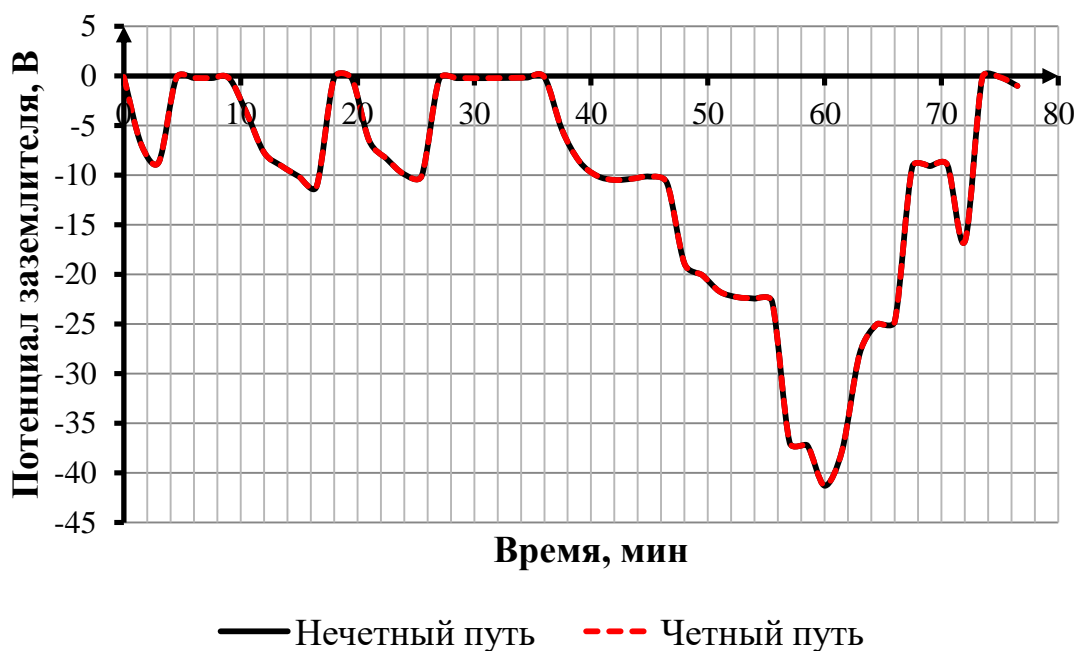


Рисунок Г.37 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

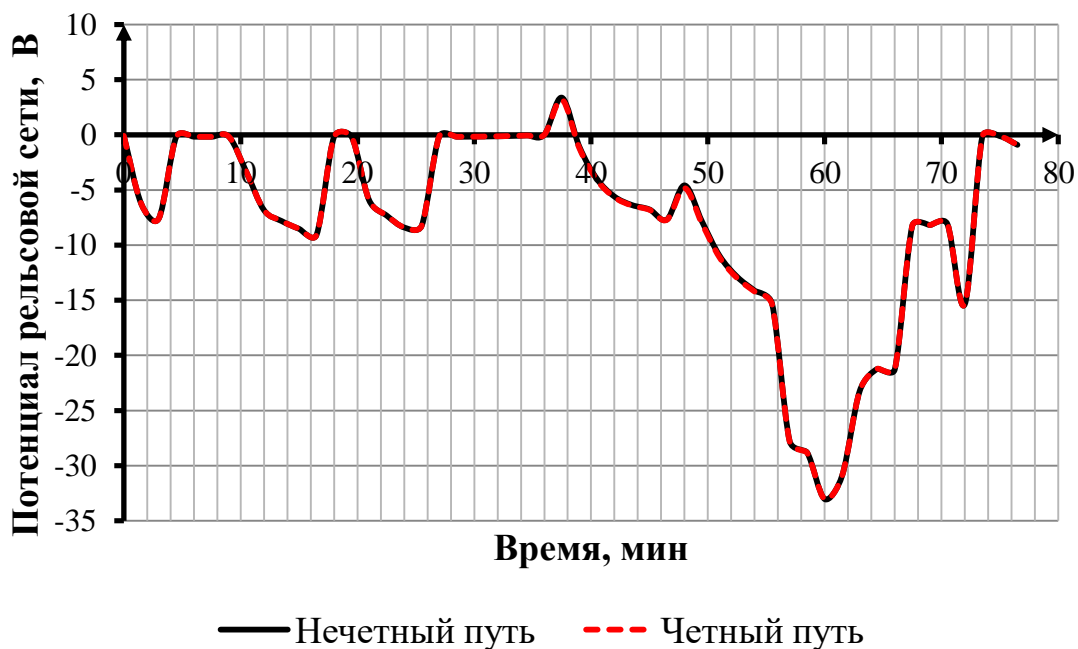


Рисунок Г.38 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



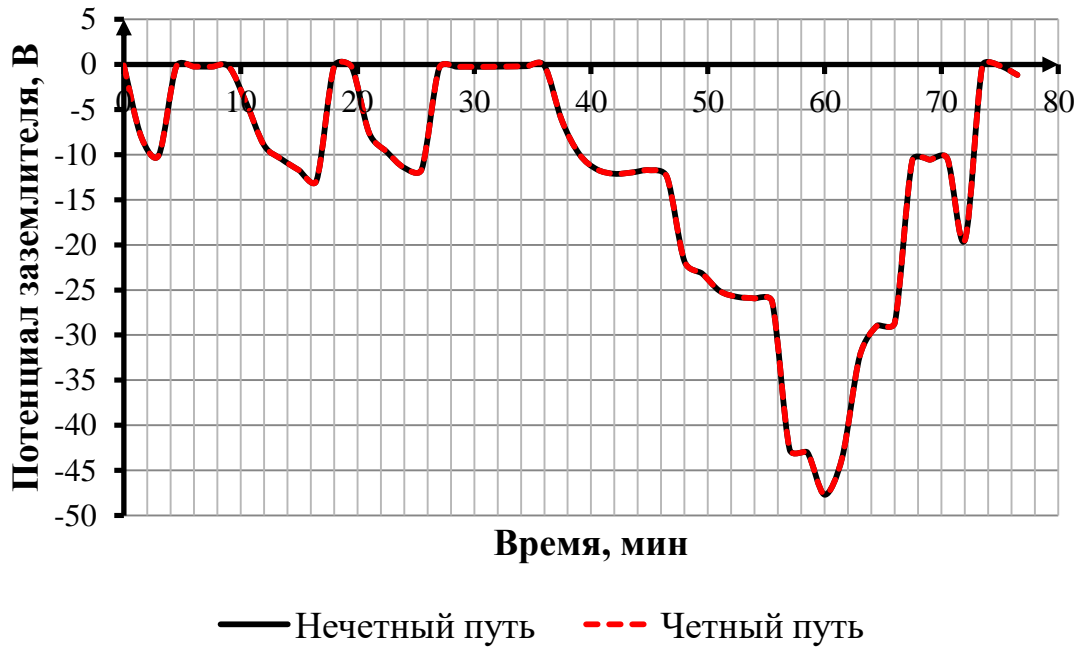


Рисунок Г.39 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от времени в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ  
«РЕЛЬСЫ-ПРОТЯЖЕННЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ» ОТНОСИТЕЛЬНО  
УДАЛЕННОЙ ЗЕМЛИ ОТ КООРДИНАТЫ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ  
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ  
ПРОТЯЖЕННОГО ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В РЕЖИМЕ  
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА РЕЛЬСОВУЮ СЕТЬ  
НЕЧЕТНОГО ПУТИ



Рисунок Д.1 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

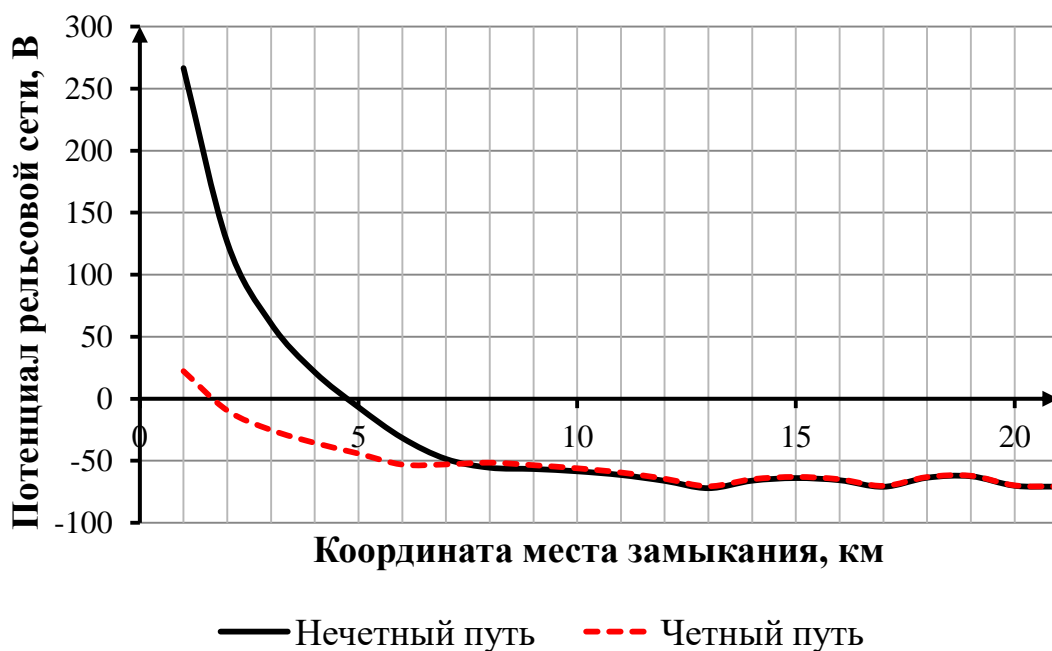


Рисунок Д.2 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

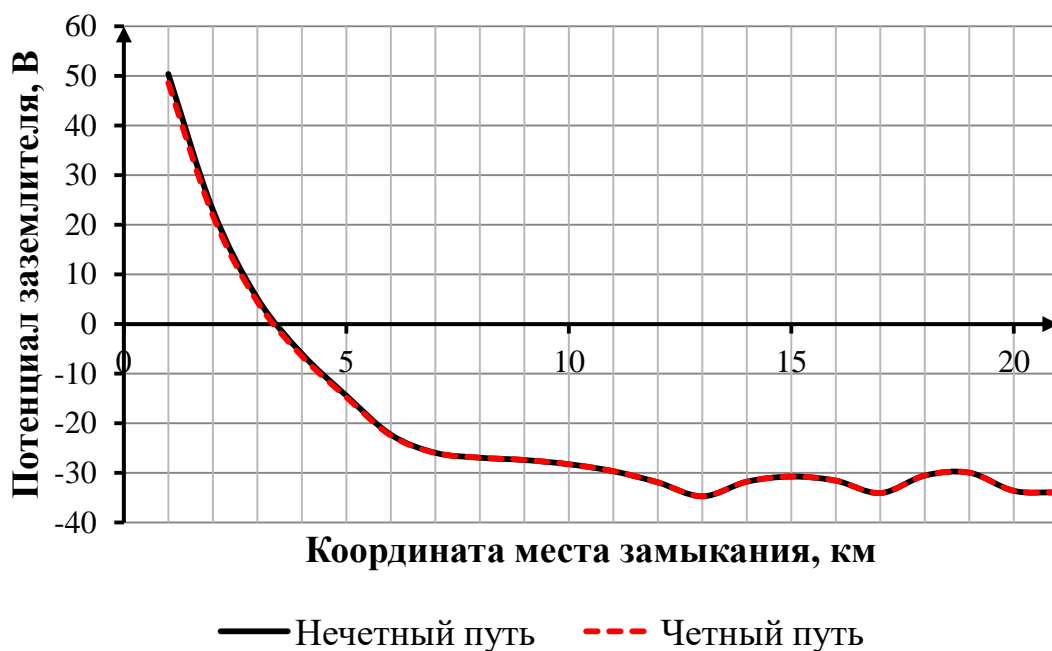


Рисунок Д.3 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

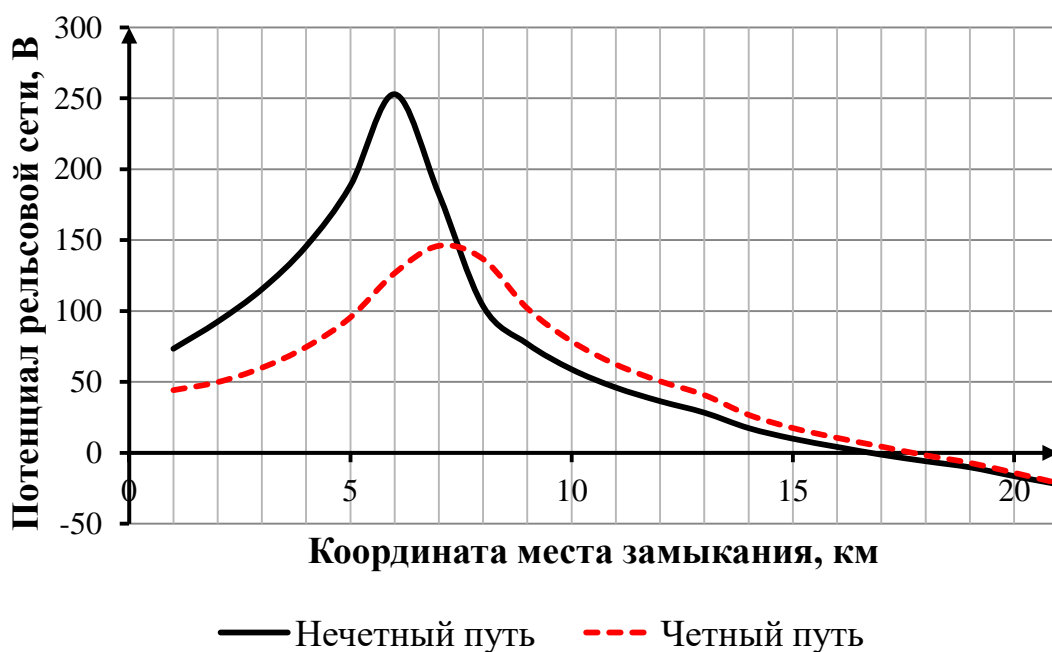


Рисунок Д.4 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

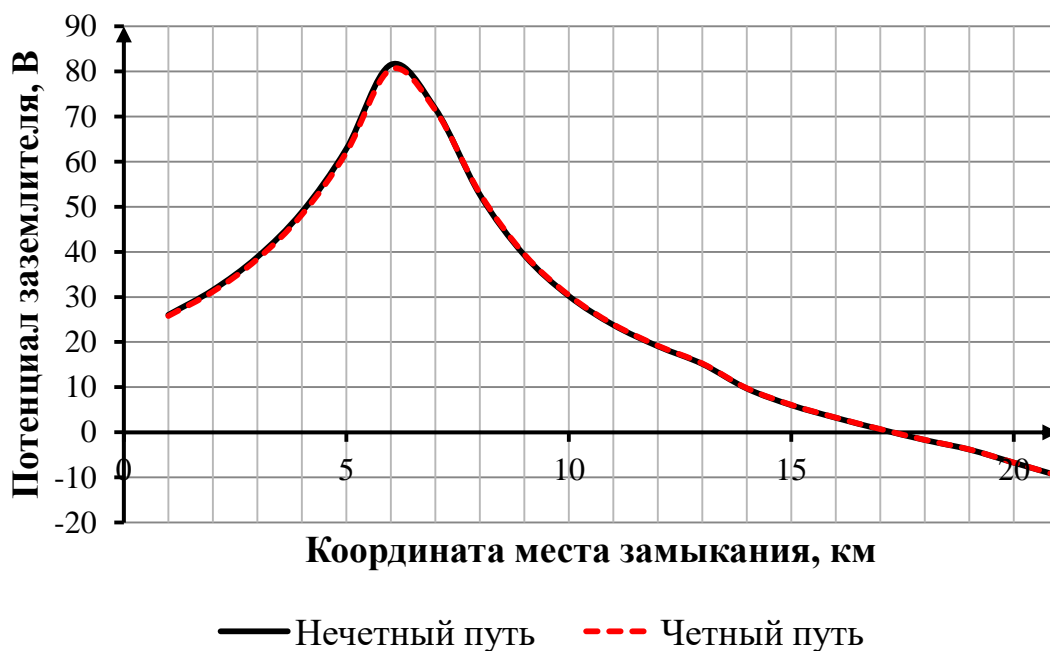


Рисунок Д.5 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

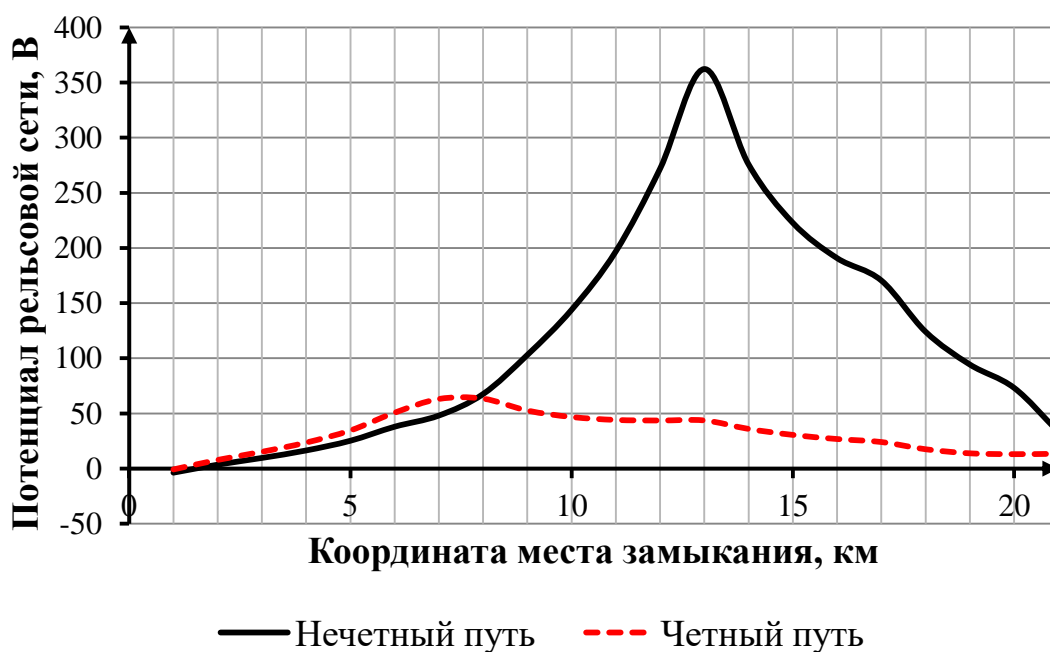


Рисунок Д.6 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

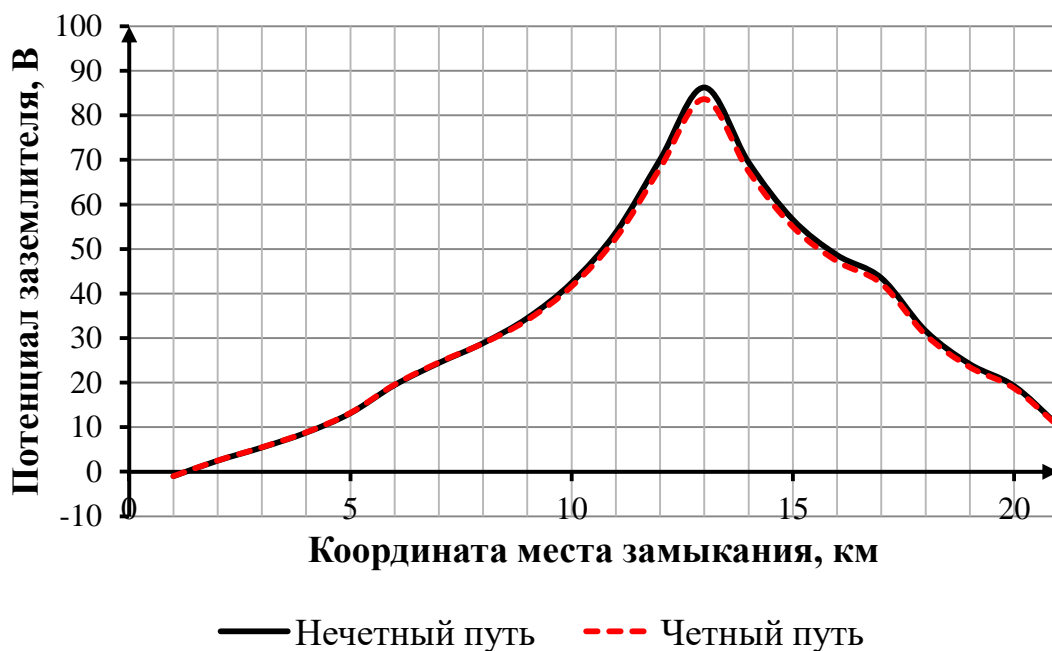


Рисунок Д.7 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

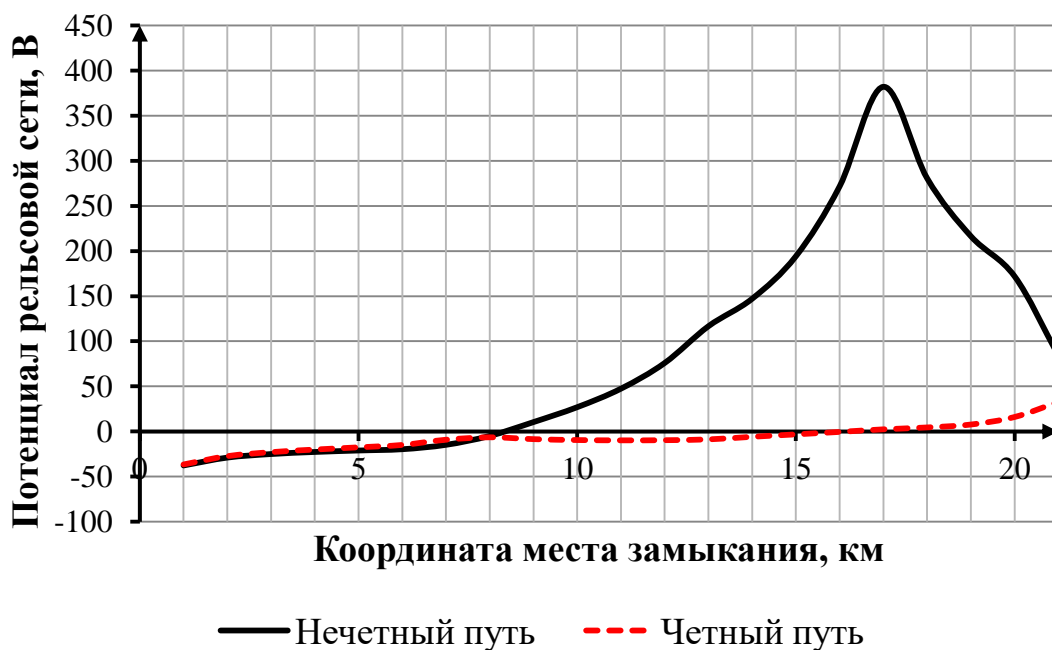


Рисунок Д.8 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

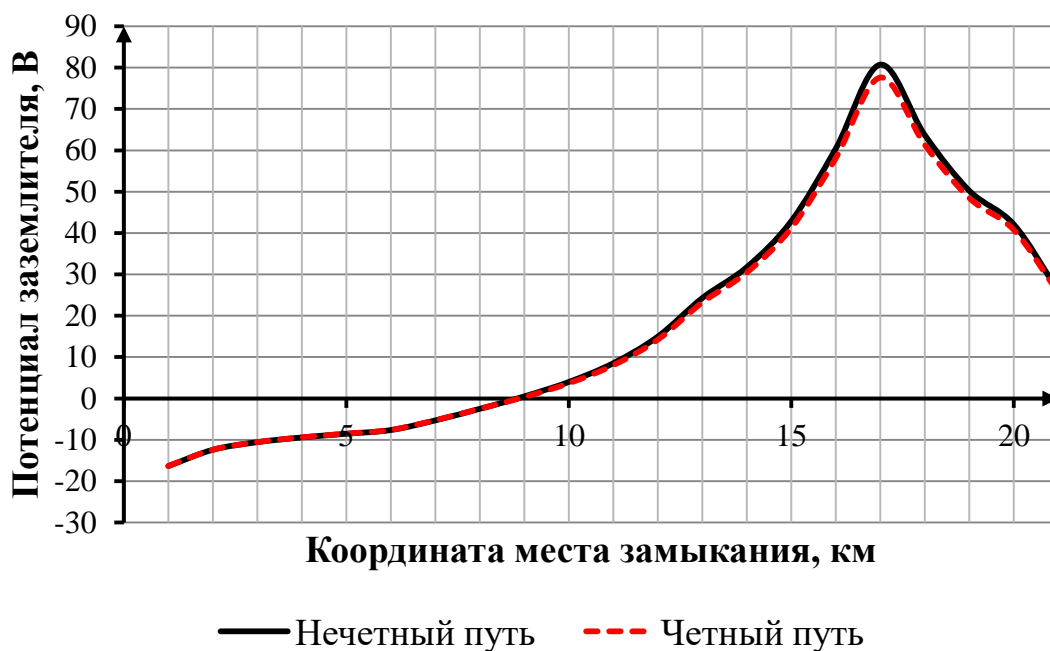


Рисунок Д.9 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

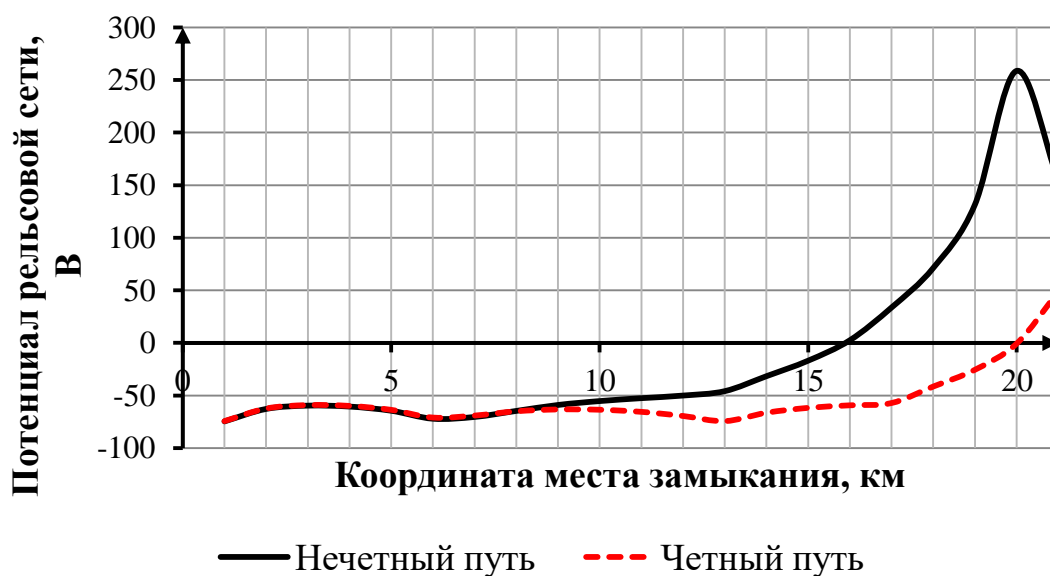


Рисунок Д.10 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом

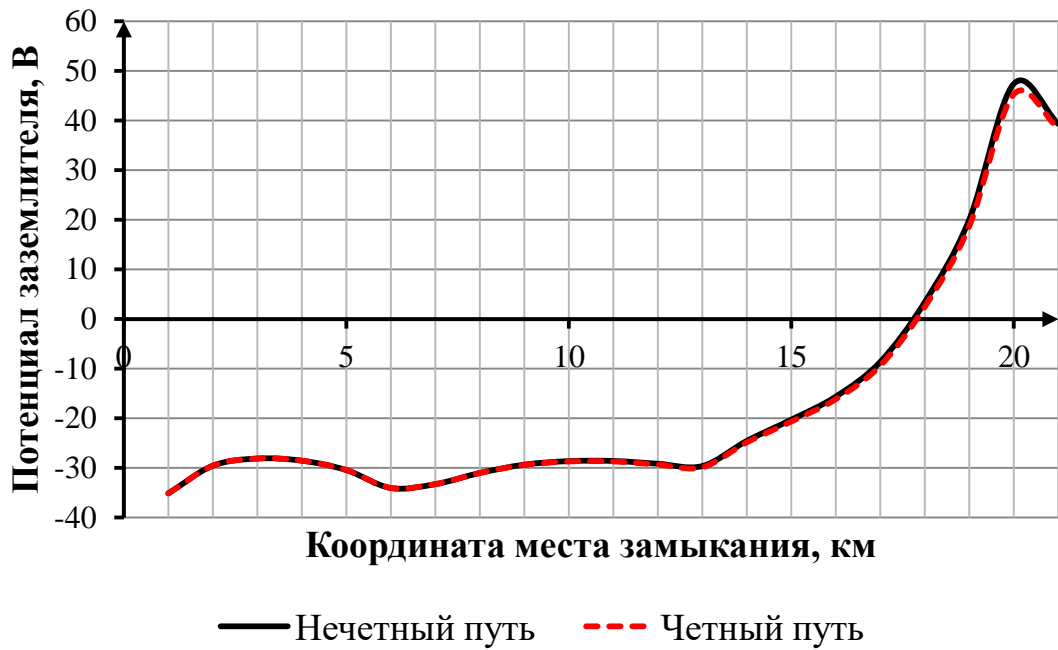


Рисунок Д.11 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом



Рисунок Д.12 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом





Рисунок Д.13 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с горизонтальным заземляющим электродом



Рисунок Д.14 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

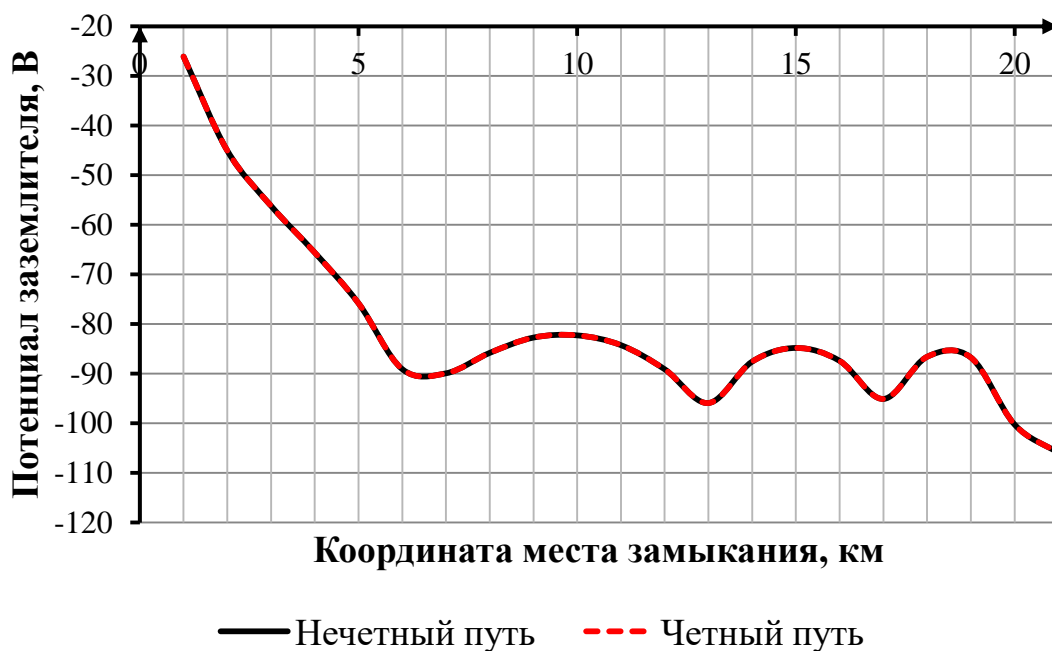


Рисунок Д.15 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

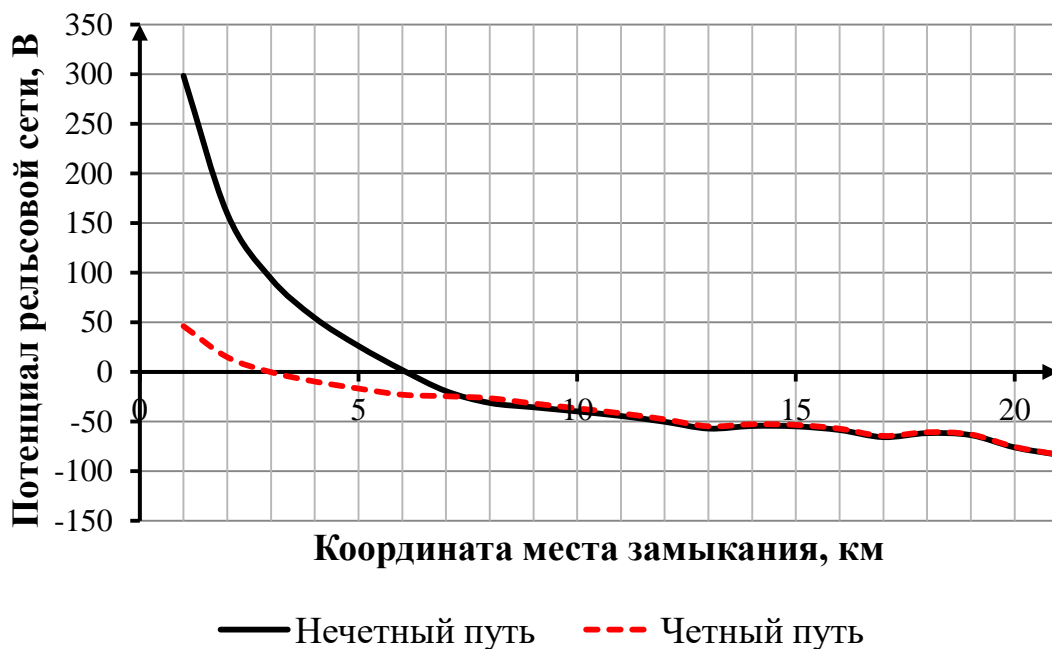


Рисунок Д.16 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



Рисунок Д.17 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

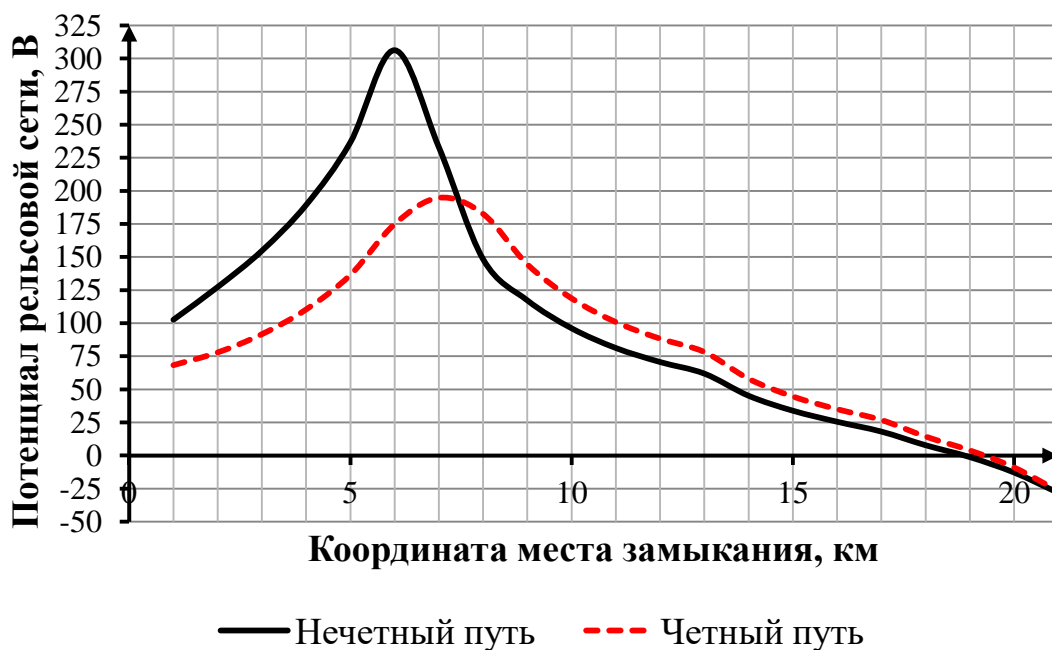


Рисунок Д.18 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

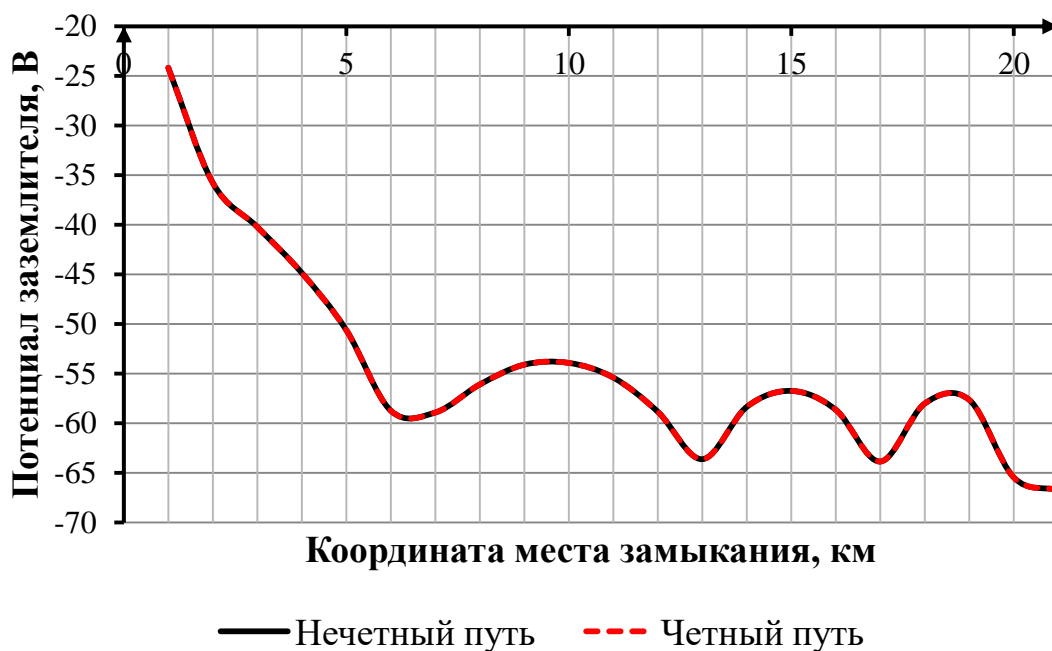


Рисунок Д.19 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

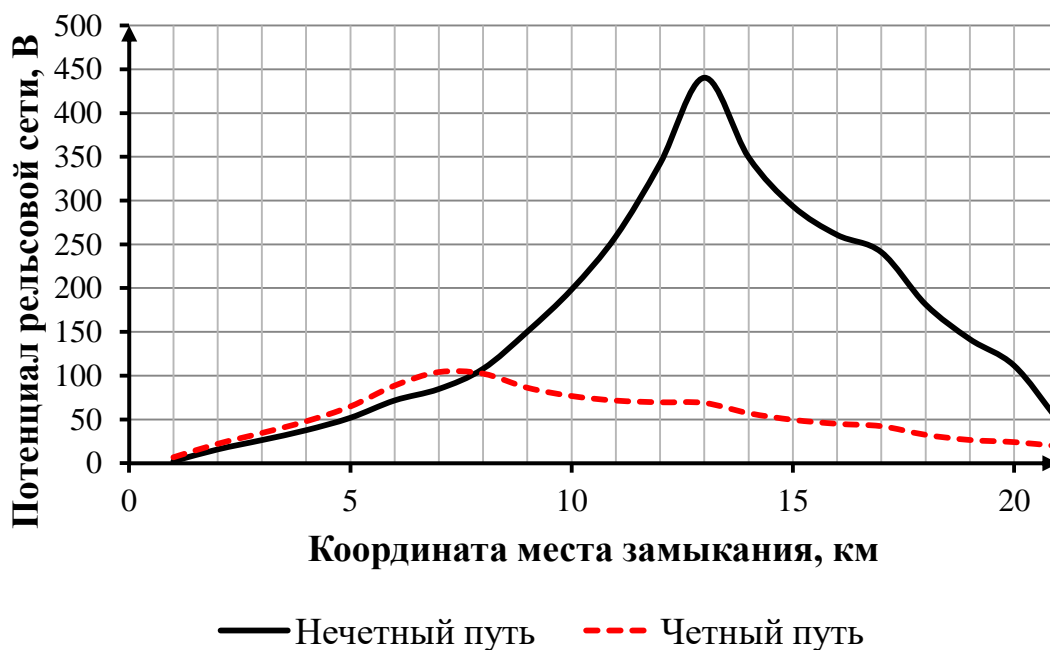


Рисунок Д.20 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

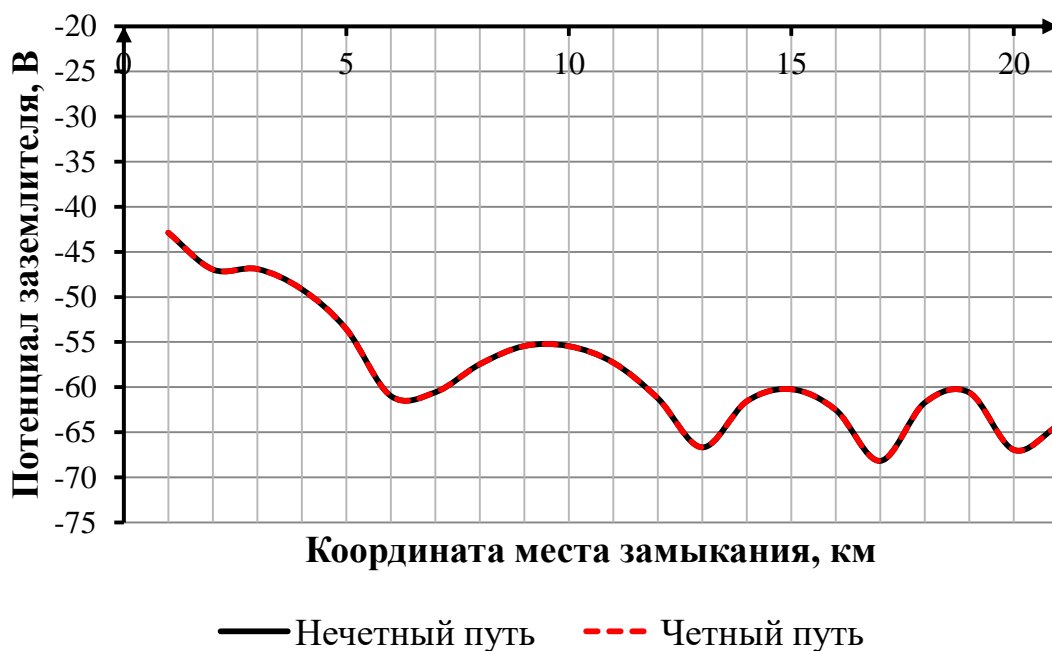


Рисунок Д.21 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

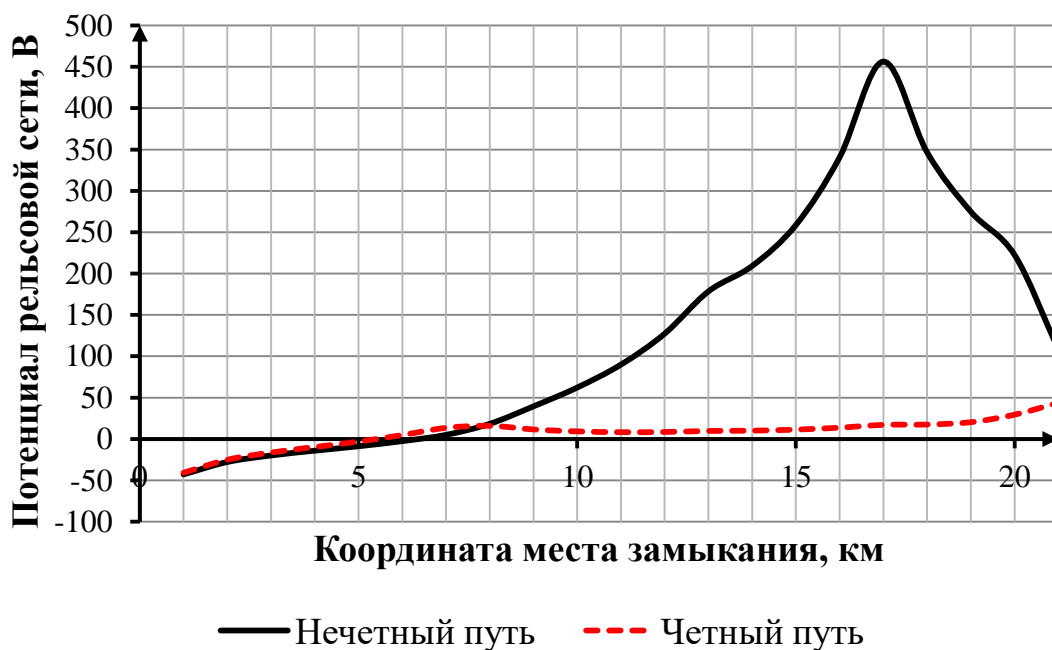


Рисунок Д.22 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



Рисунок Д.23 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

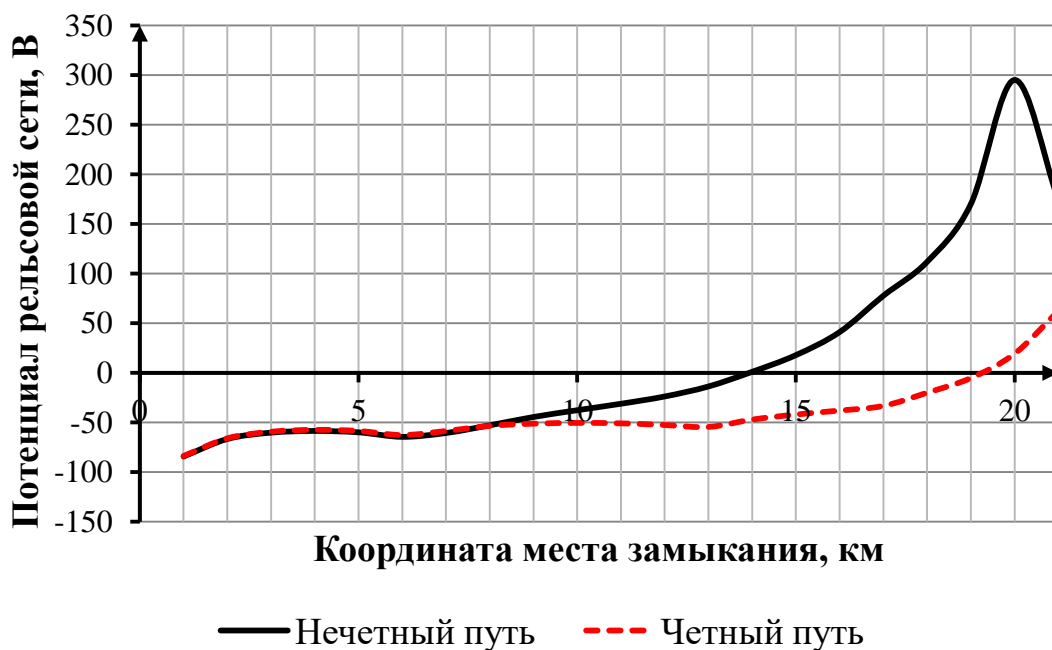


Рисунок Д.24 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



Рисунок Д.25 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



Рисунок Д.26 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя



Рисунок Д.27 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием комбинированного заземлителя

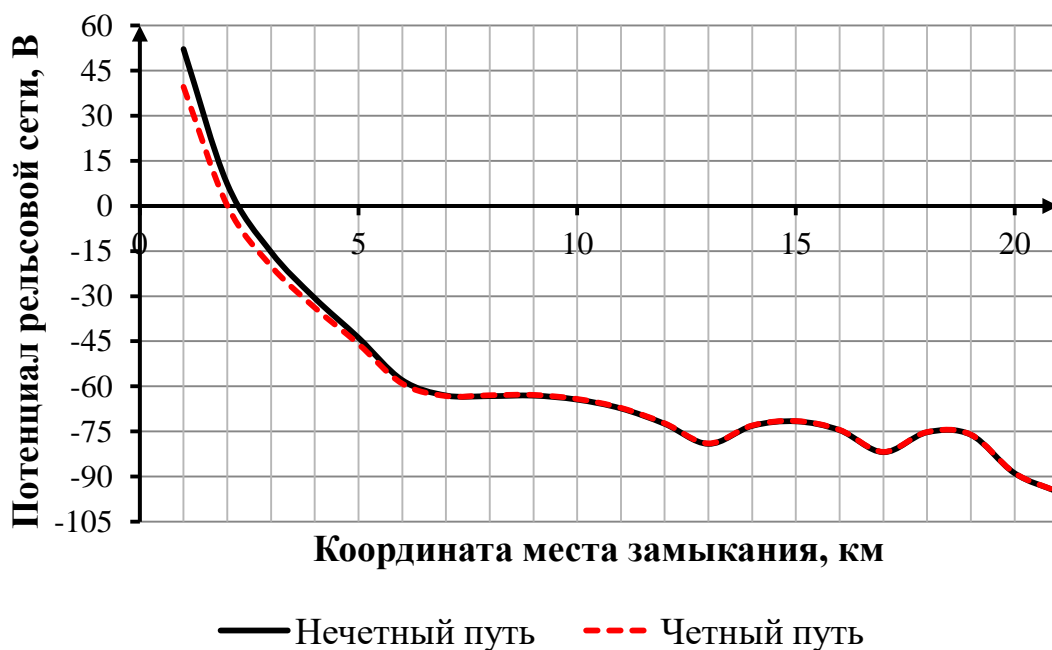


Рисунок Д.28 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода





Рисунок Д.29 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сарга» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

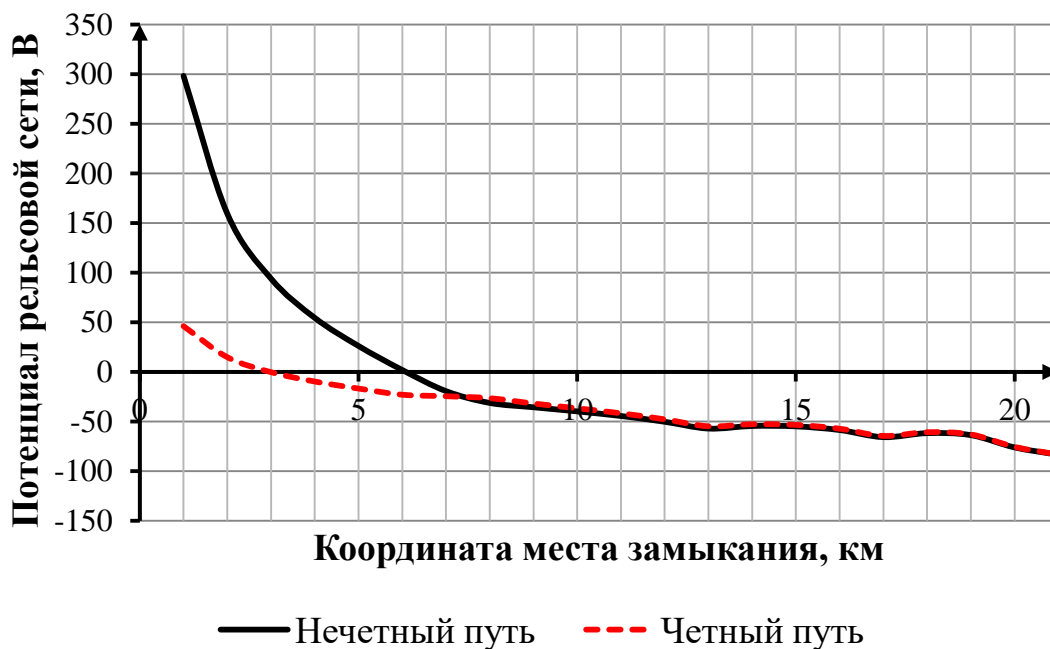


Рисунок Д.30 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.31 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 5,6» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

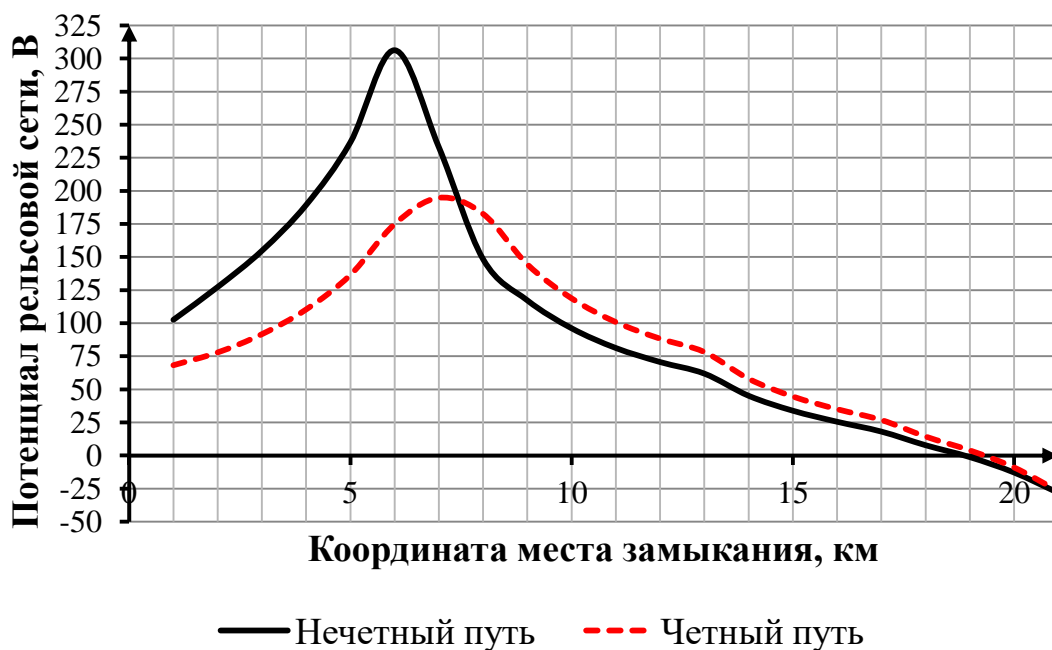


Рисунок Д.32 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

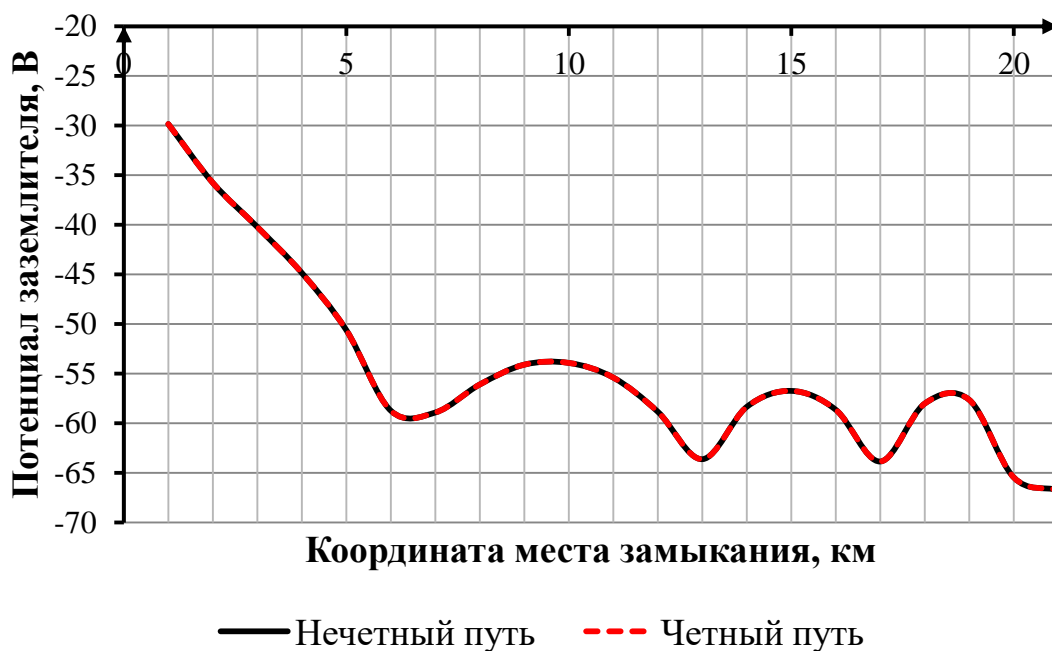


Рисунок Д.33 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1693» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

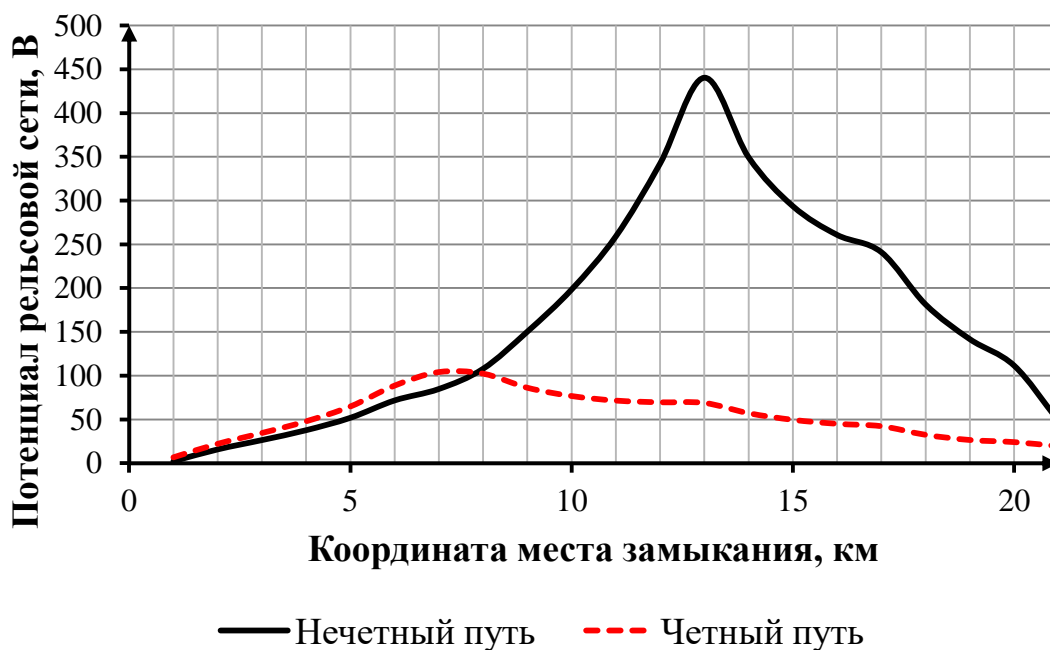


Рисунок Д.34 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.35 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения поста секционирования «ПС Берлога» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

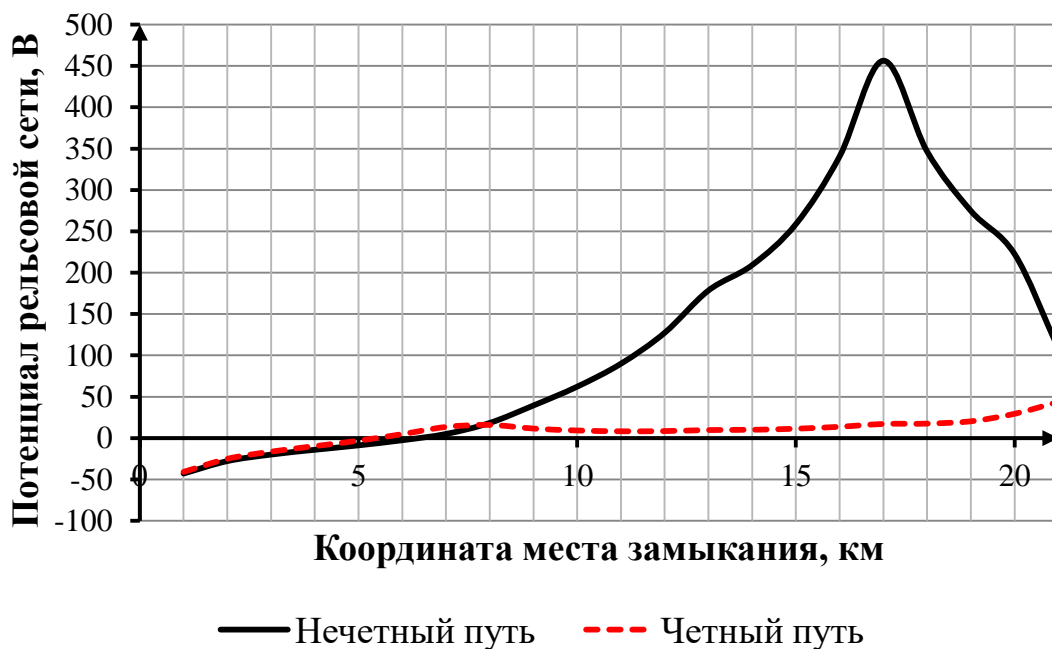


Рисунок Д.36 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.37 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1704» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

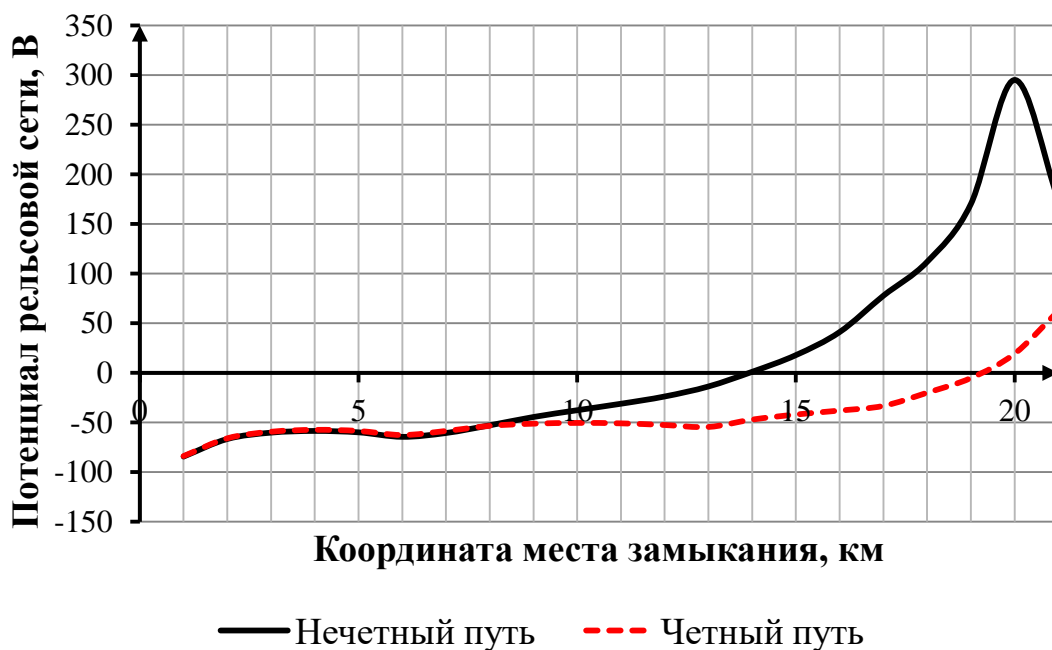


Рисунок Д.38 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.39 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения пункта параллельного соединения «ППС 1707» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.40 – Зависимость потенциала рельсовой сети обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода



Рисунок Д.41 – Зависимость потенциала заземлителя обоих путей от координаты места замыкания в месте расположения тяговой подстанции «Сабик» для варианта конструктивного исполнения с использованием заземляющего провода

ЗАВИСИМОСТИ ТОКА ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ПРОТЯЖЕННОГО  
ЗАЕМЛИТЕЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ «САРГА» И «САБИК»  
ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ ПРОПУСКЕ ПАКЕТОВ ПОЕЗДОВ



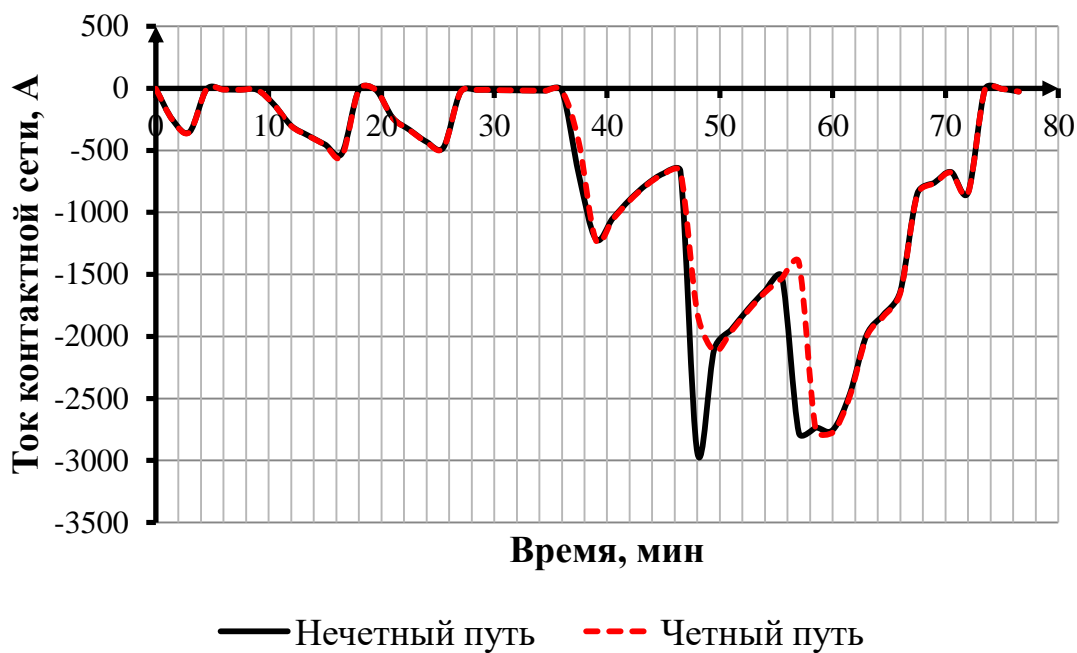


Рисунок Е.1 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении горизонтального заземляющего электрода

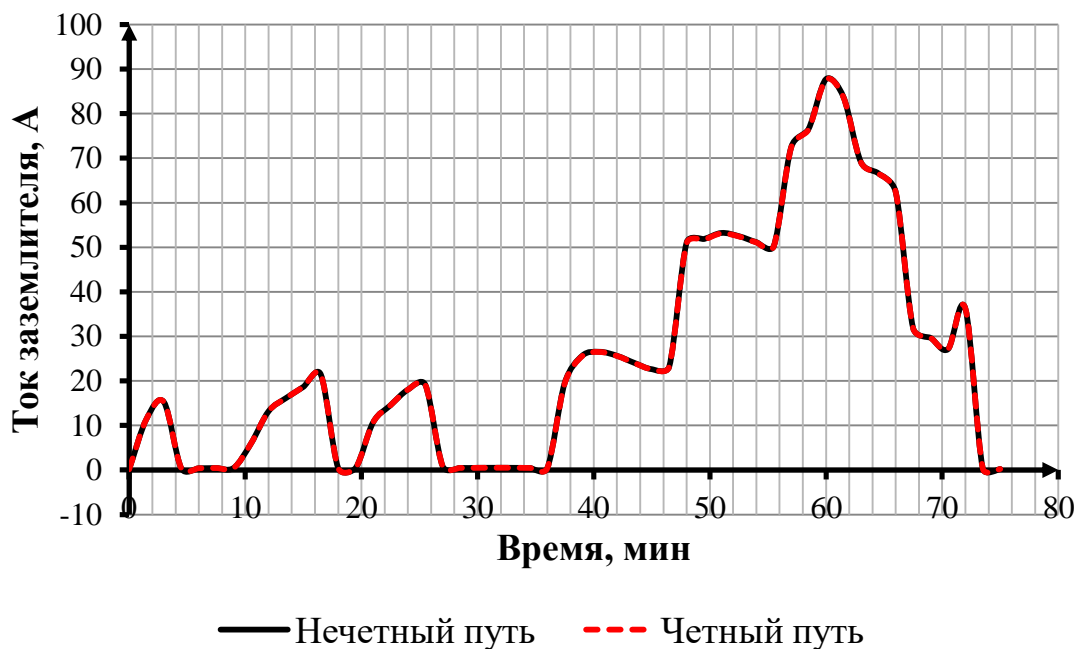


Рисунок Е.2 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении горизонтального заземляющего электрода

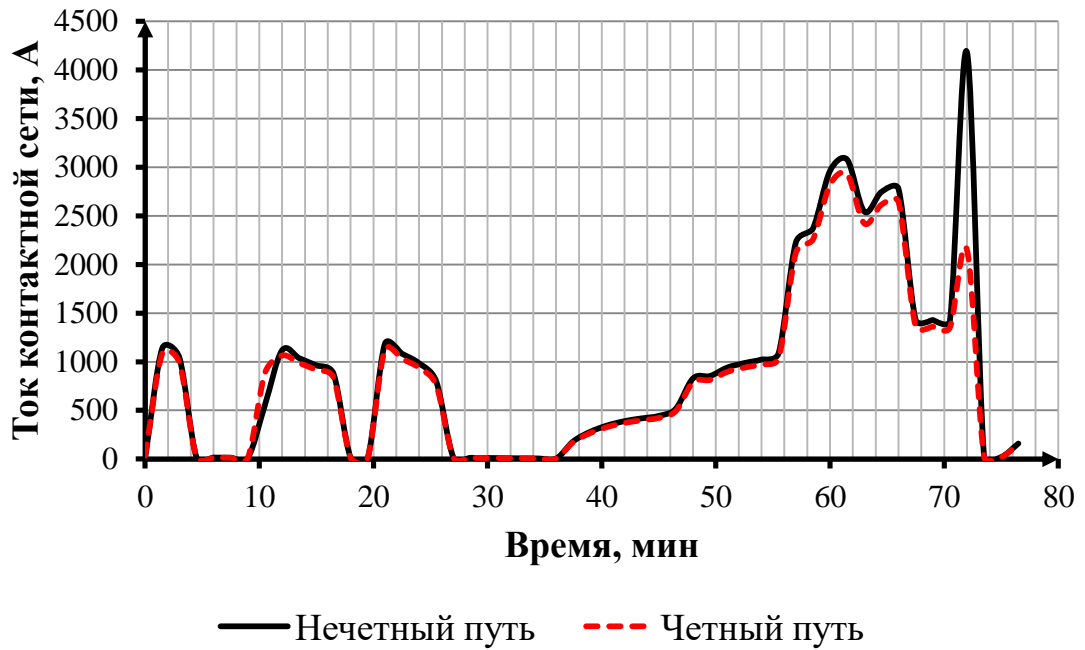


Рисунок Е.3 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении комбинированного заземлителя

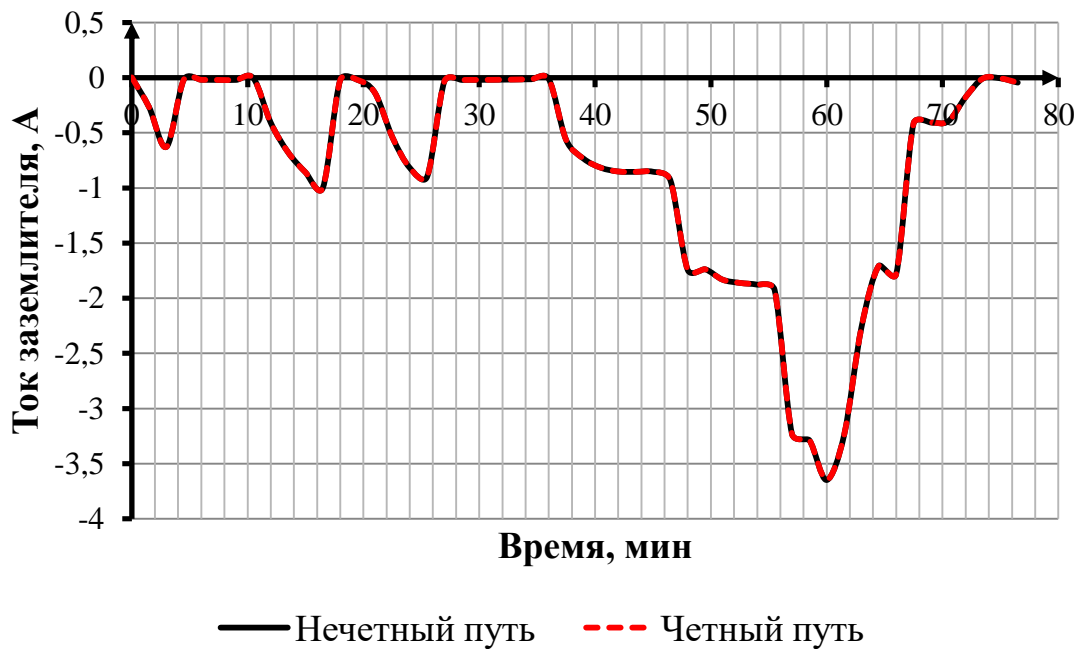


Рисунок Е.4 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении комбинированного заземлителя

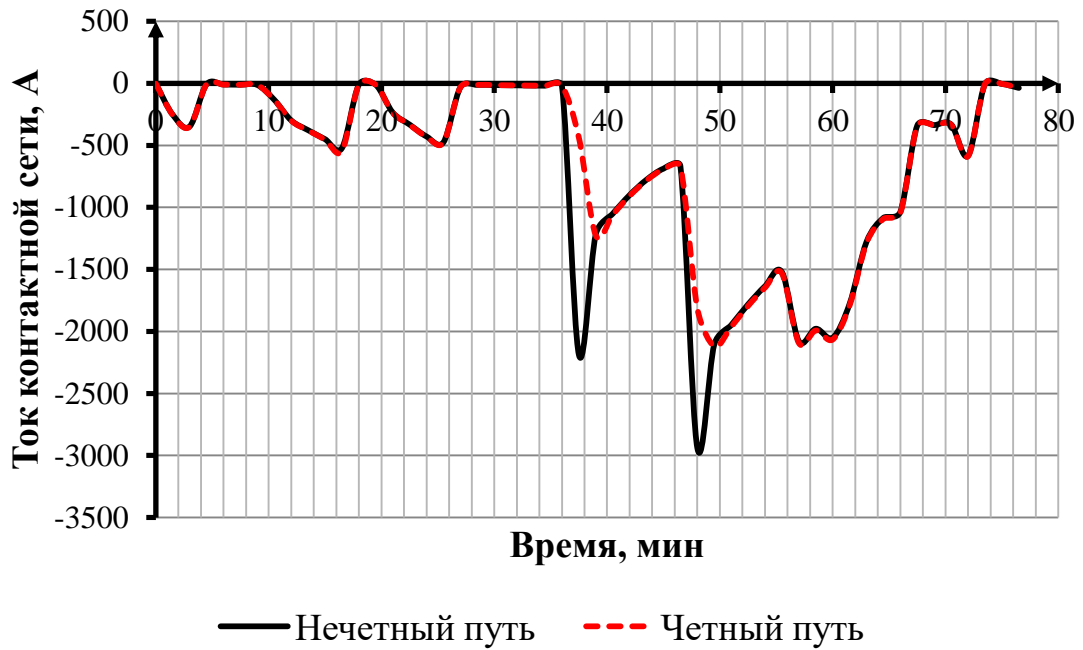


Рисунок Е.5 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении комбинированного заземлителя

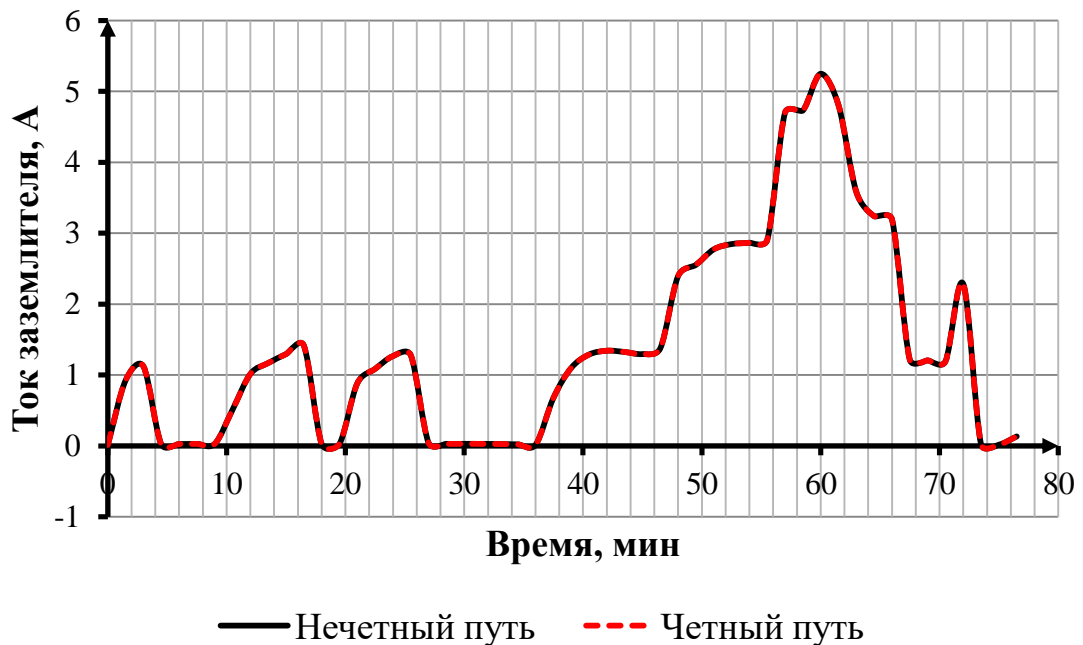


Рисунок Е.6 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении комбинированного заземлителя

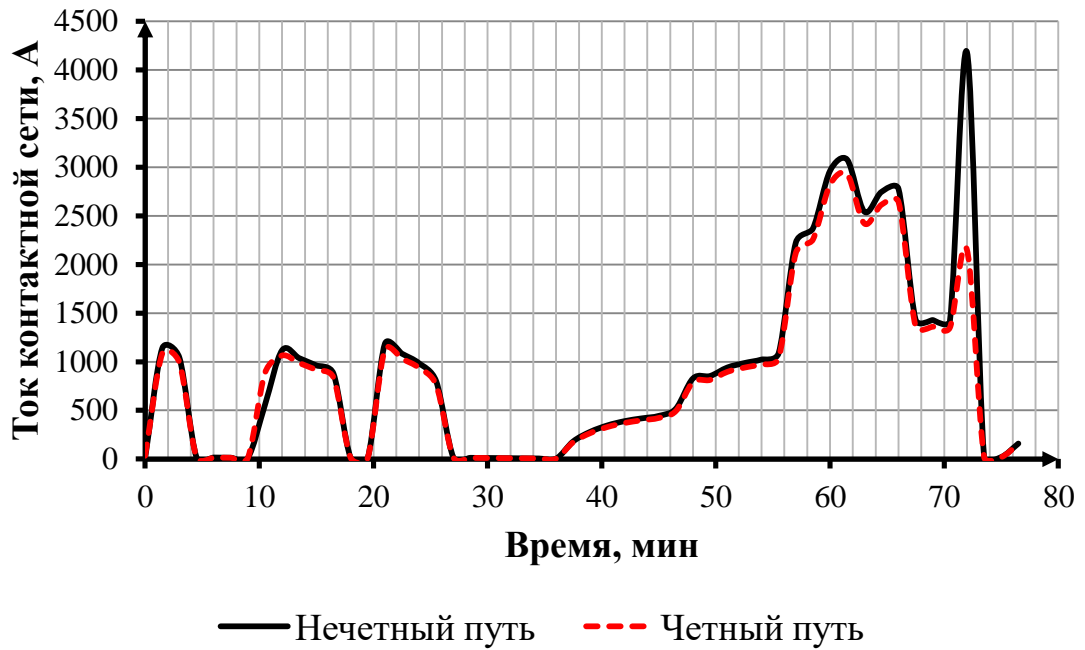


Рисунок Е.7 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении заземляющего провода

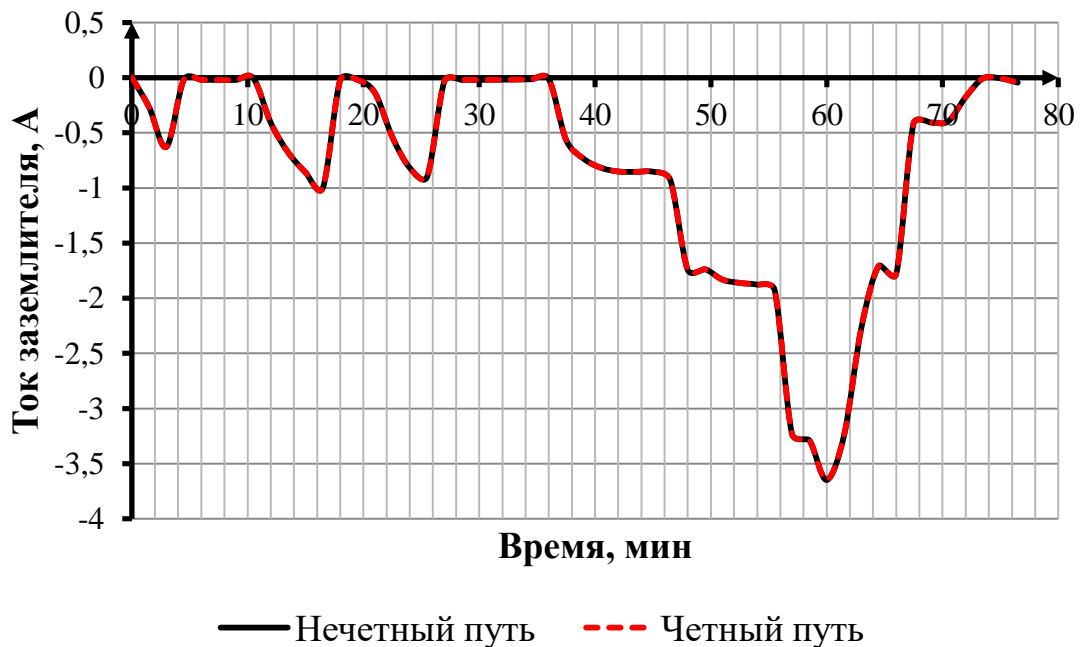


Рисунок Е.8 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении заземляющего провода

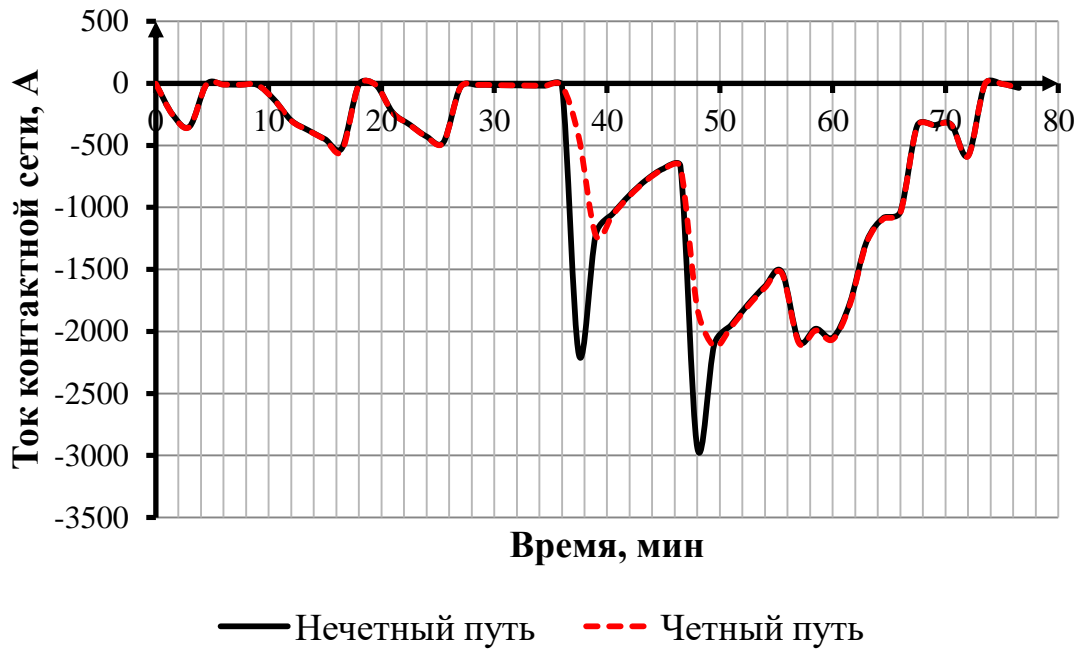


Рисунок Е.9 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении заземляющего провода

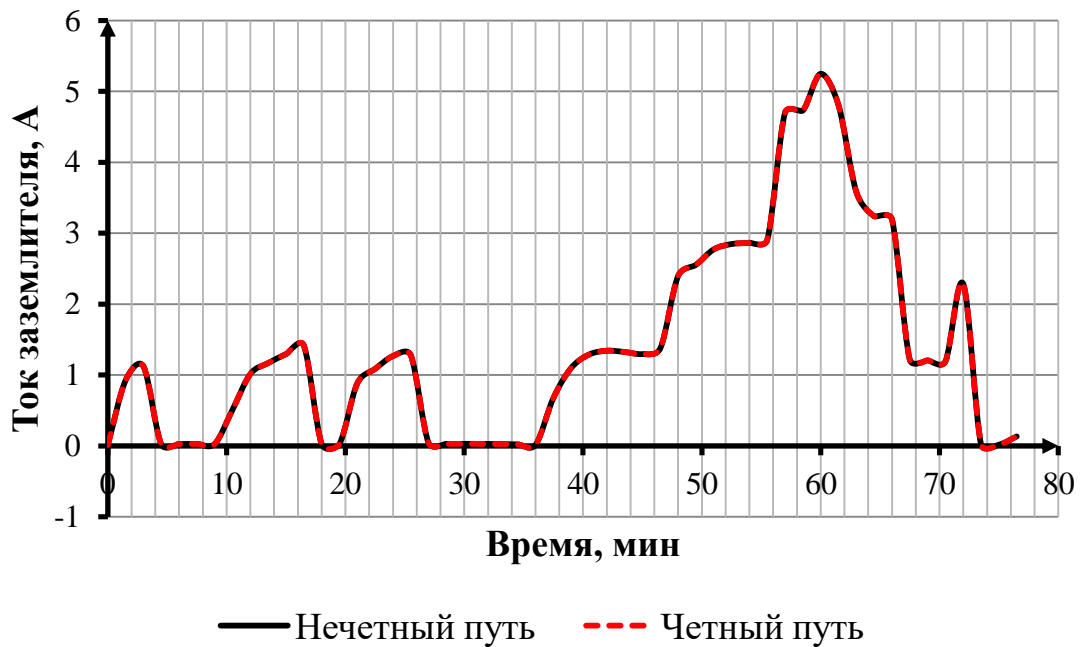


Рисунок Е.10 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от времени в нормальном режиме при применении заземляющего провода

ЗАВИСИМОСТИ ТОКА ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ПРОТЯЖЕННОГО  
ЗАЕМЛИТЕЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ «САРГА» И «САБИК»  
ОТ КООРДИНАТЫ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ



Рисунок Ж.1 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

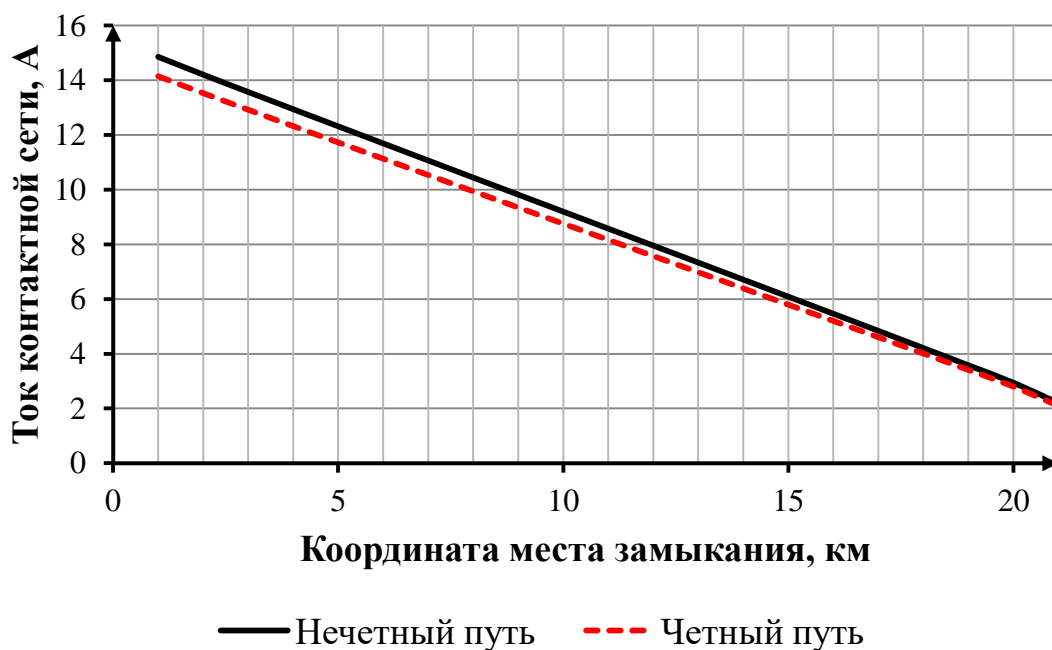


Рисунок Ж.2 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

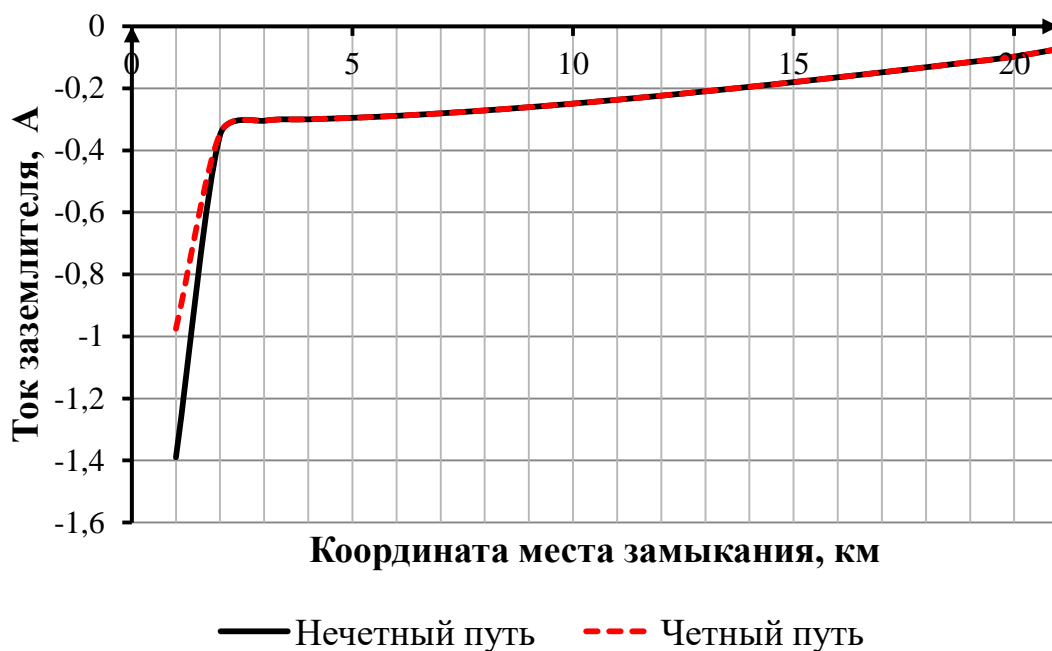


Рисунок Ж.3 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

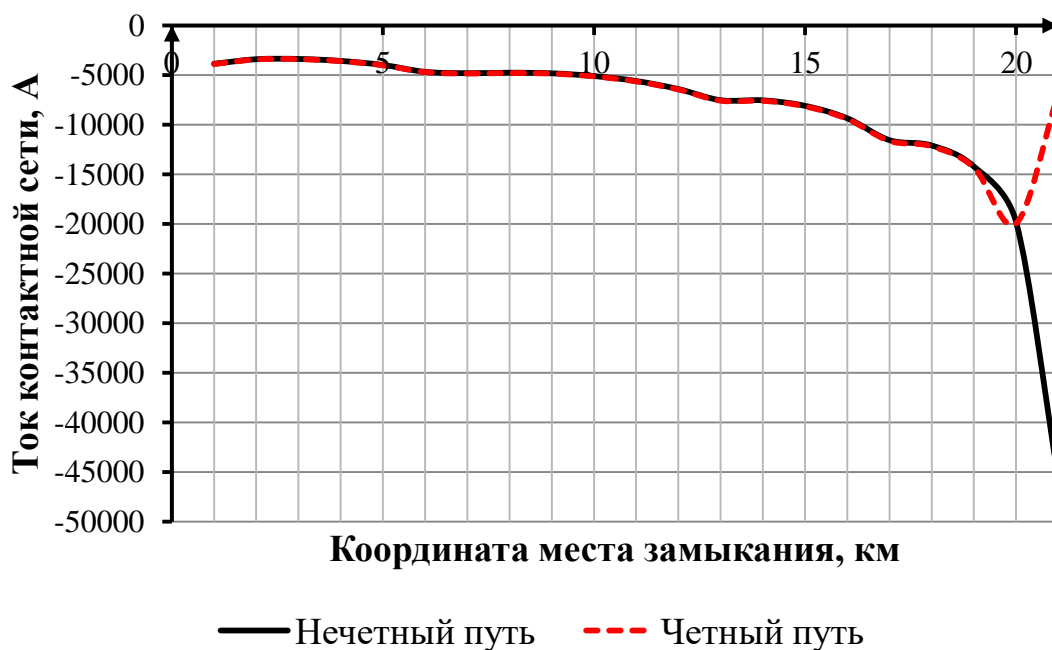


Рисунок Ж.4 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода



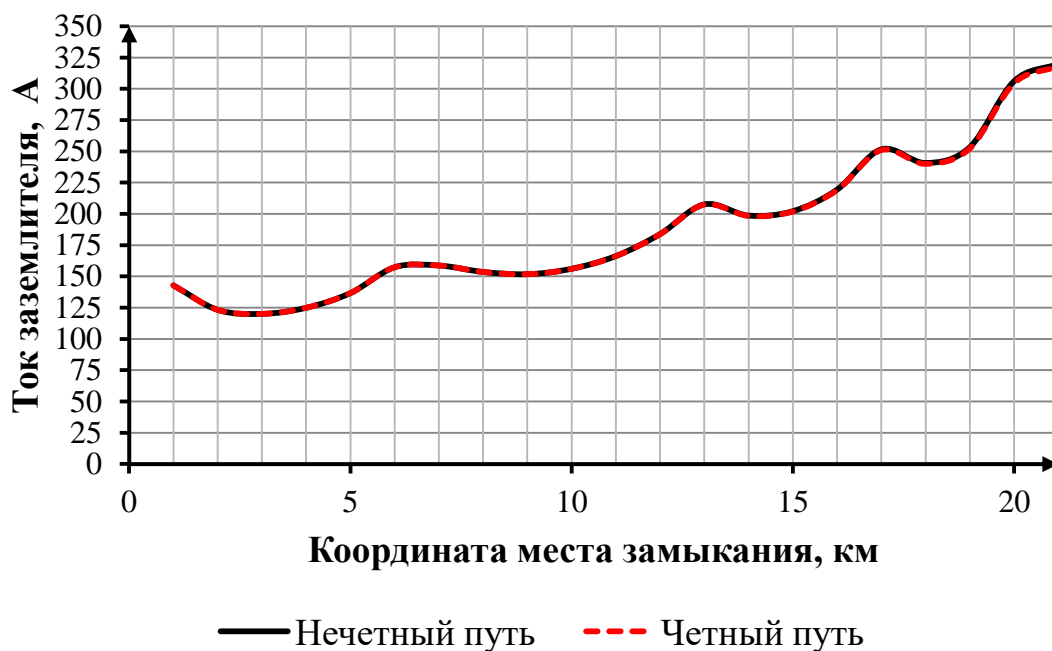


Рисунок Ж.5 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

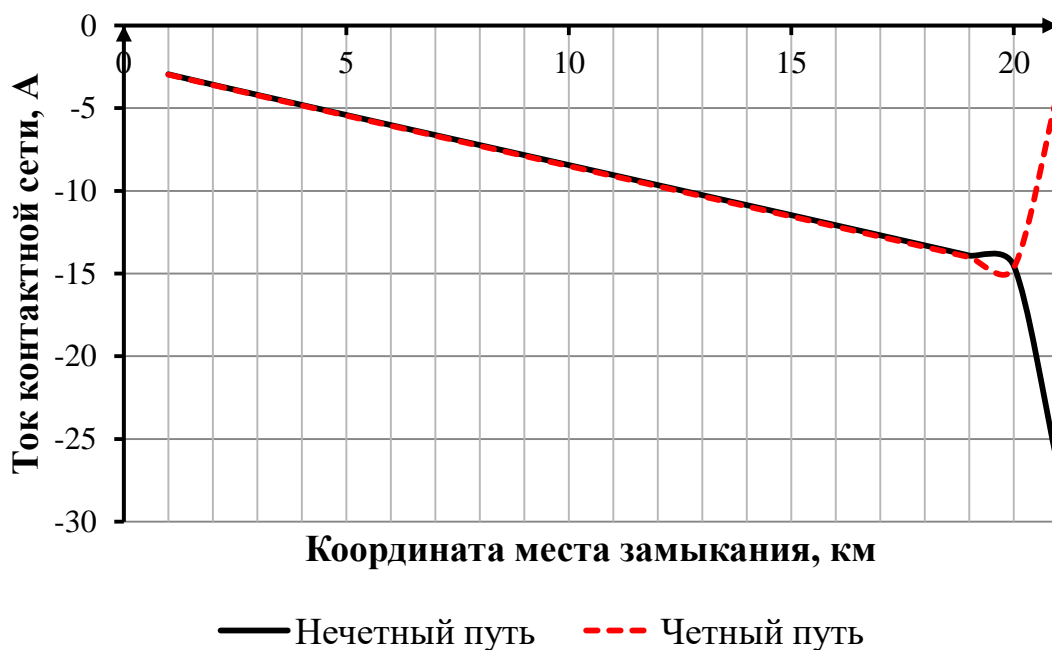


Рисунок Ж.6 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

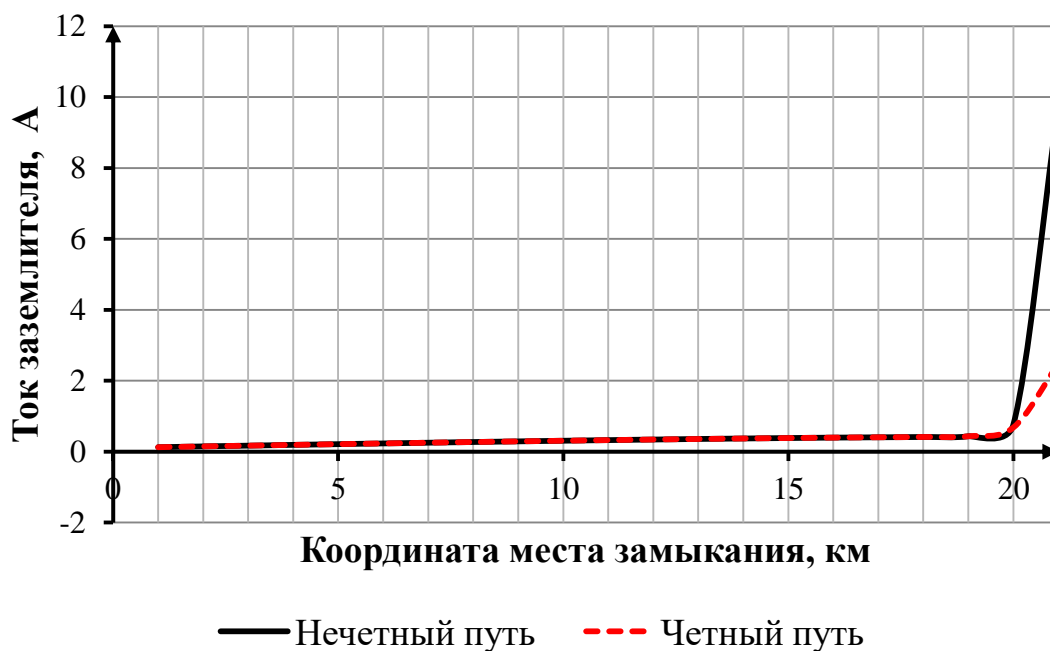


Рисунок Ж.7 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении горизонтального заземляющего электрода

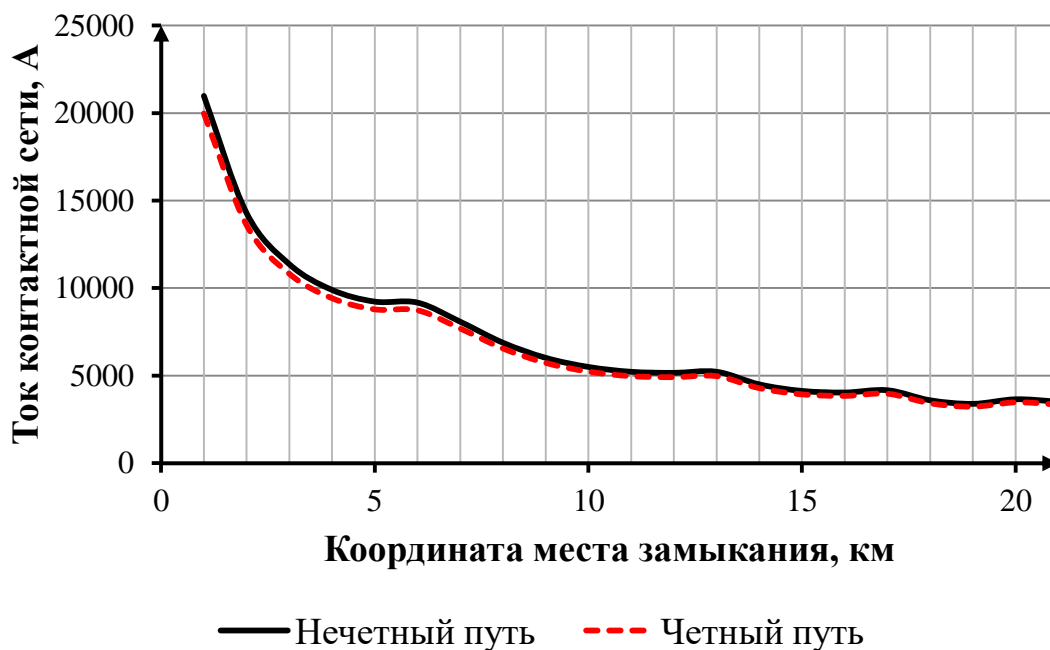


Рисунок Ж.8 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

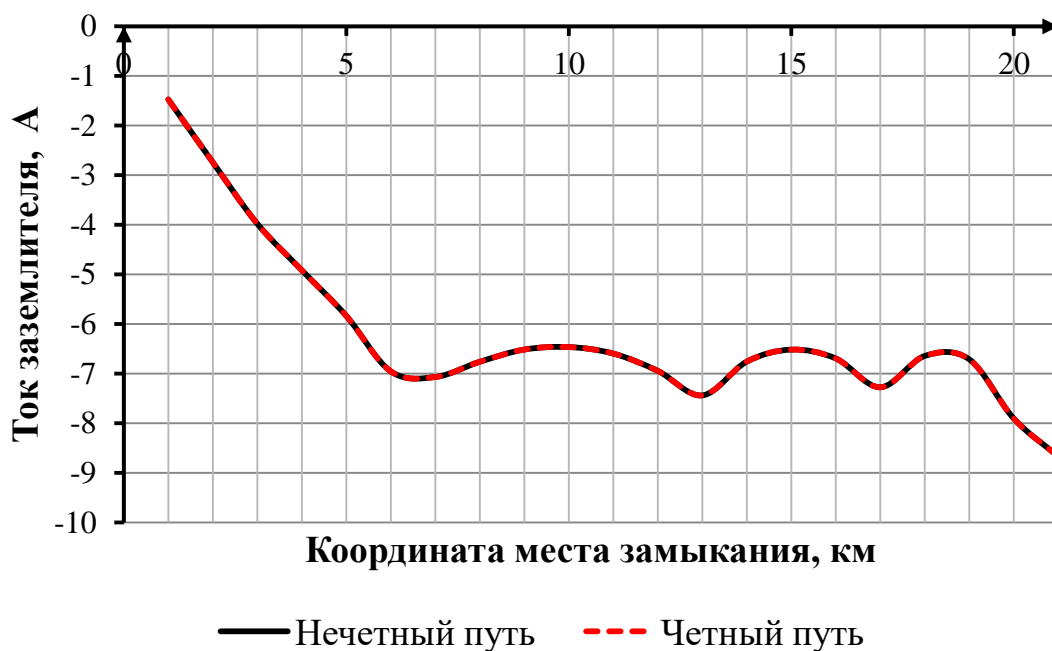


Рисунок Ж.9 – Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

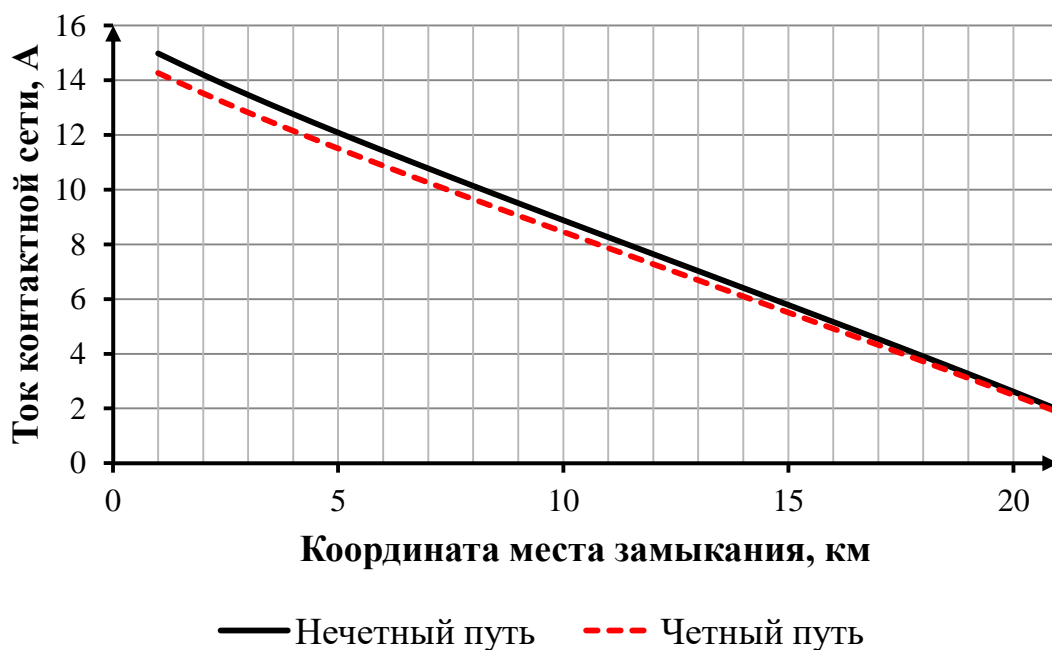


Рисунок Ж.10 – Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

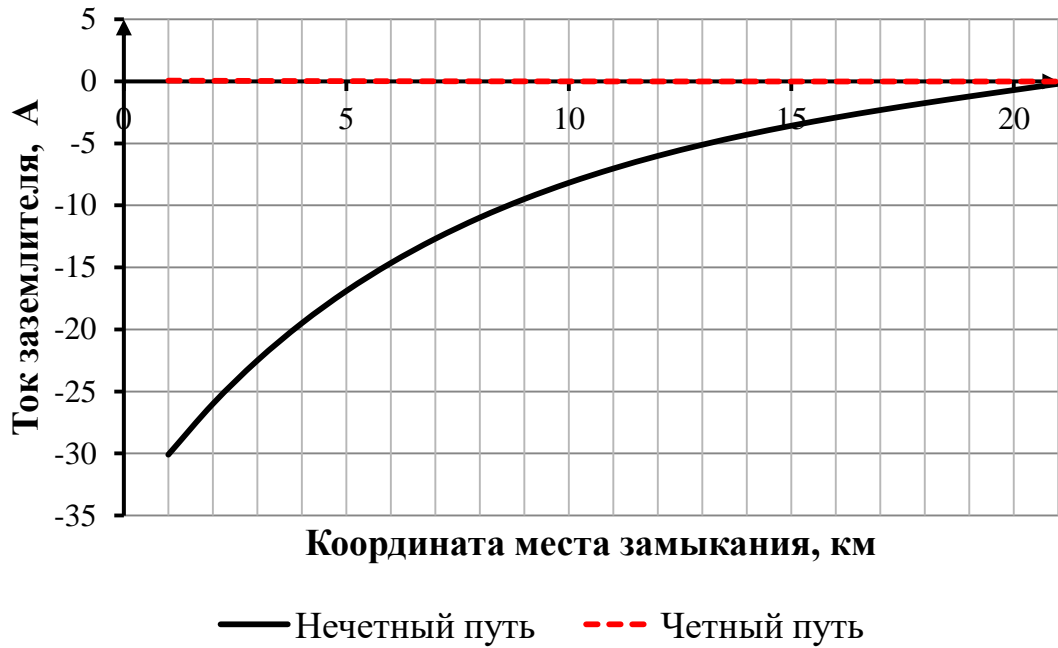


Рисунок Ж.11 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

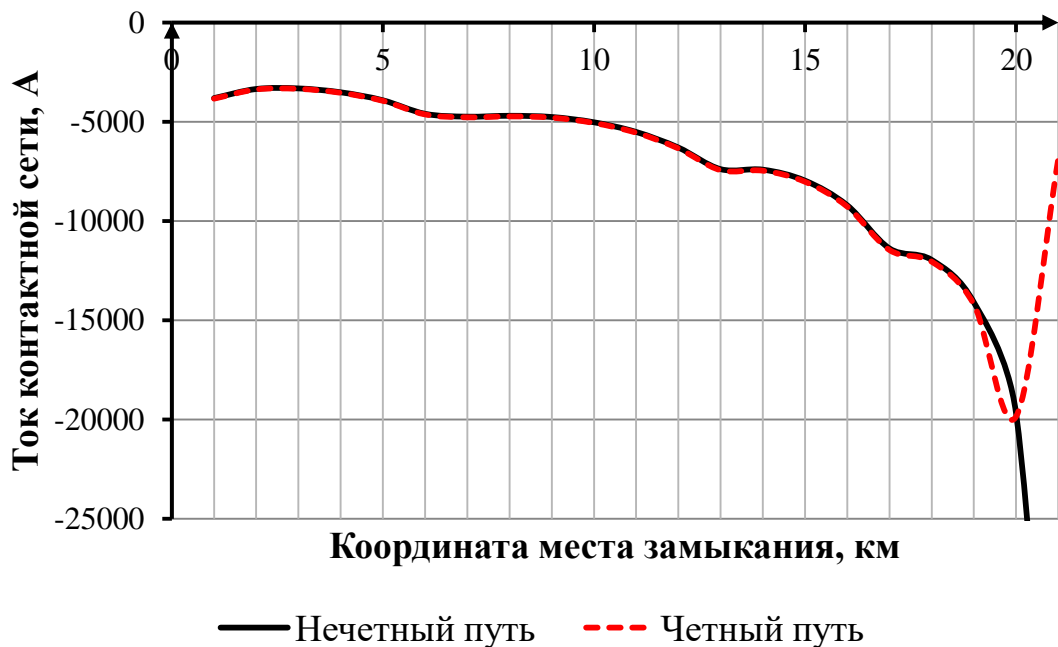


Рисунок Ж.12 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

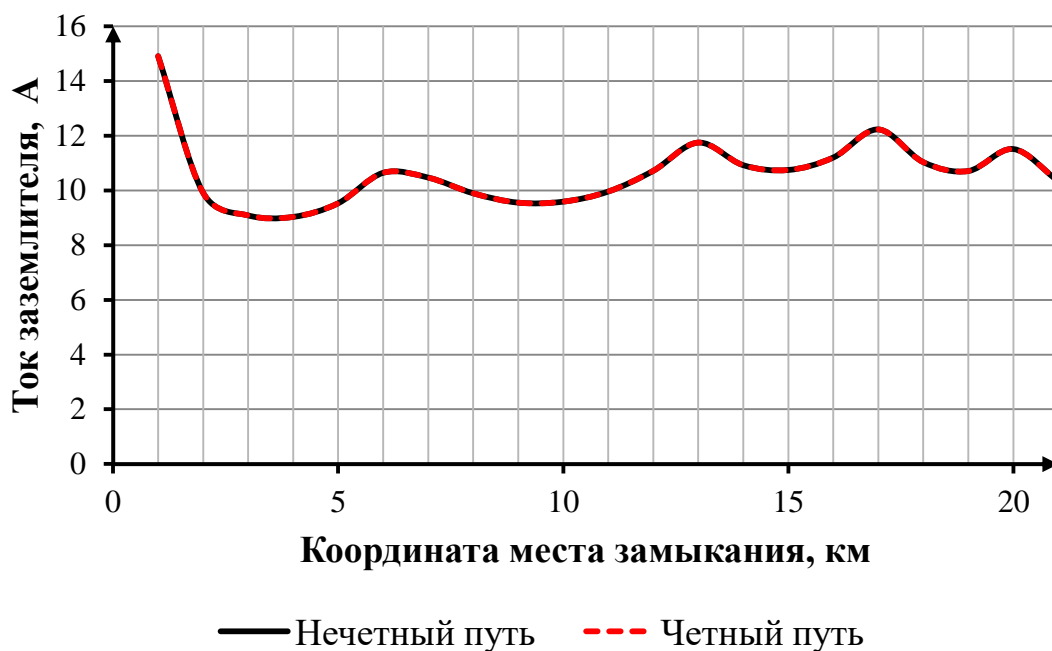


Рисунок Ж.13 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

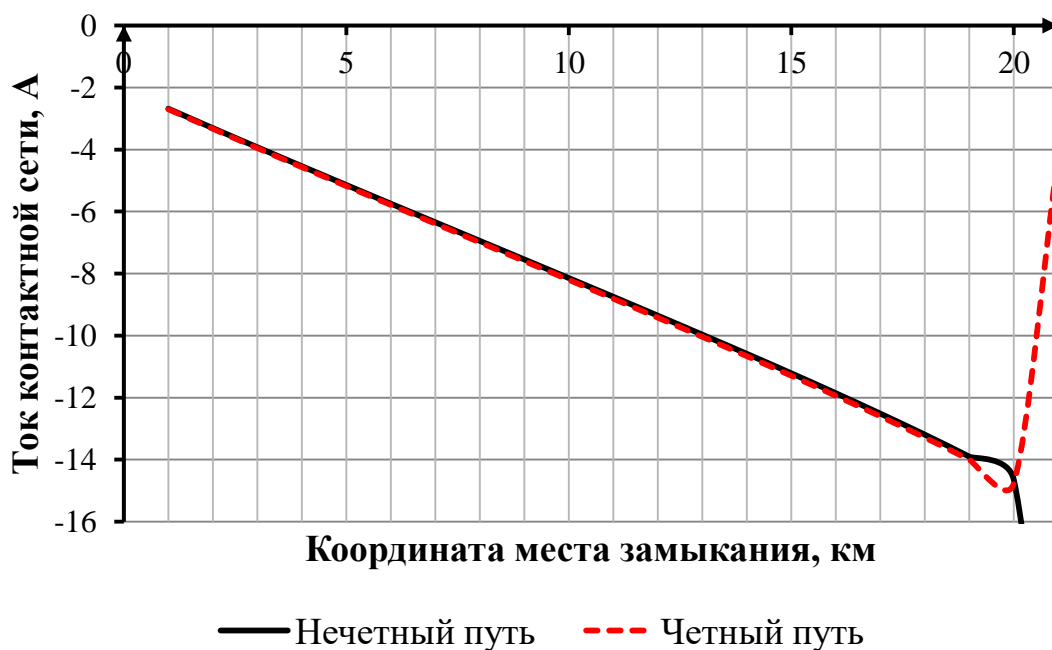


Рисунок Ж.14 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

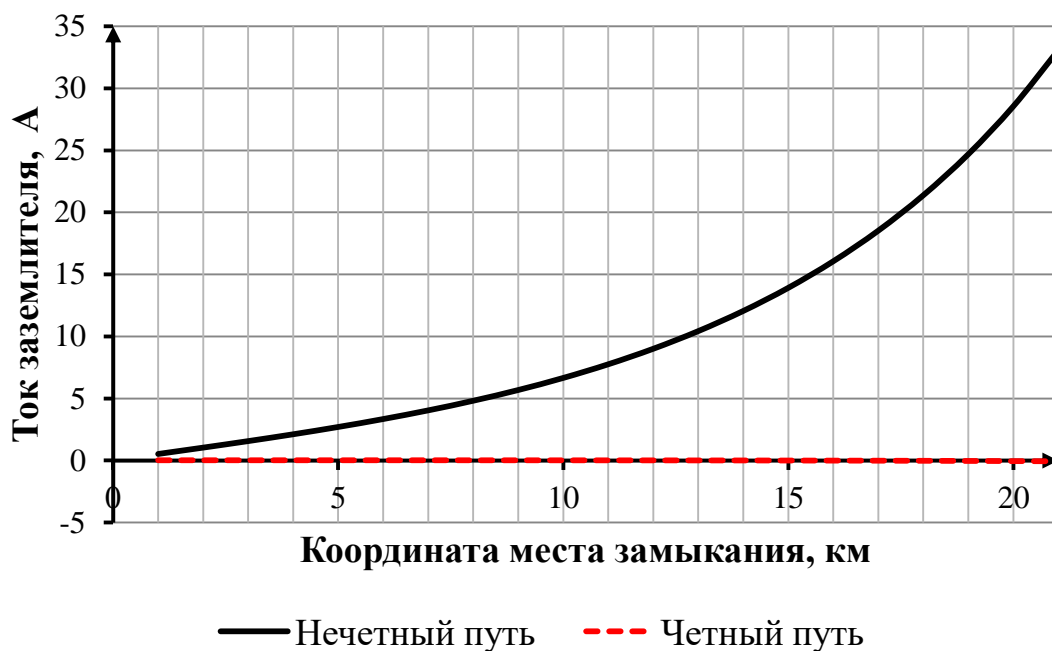


Рисунок Ж.15 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении комбинированного заземлителя

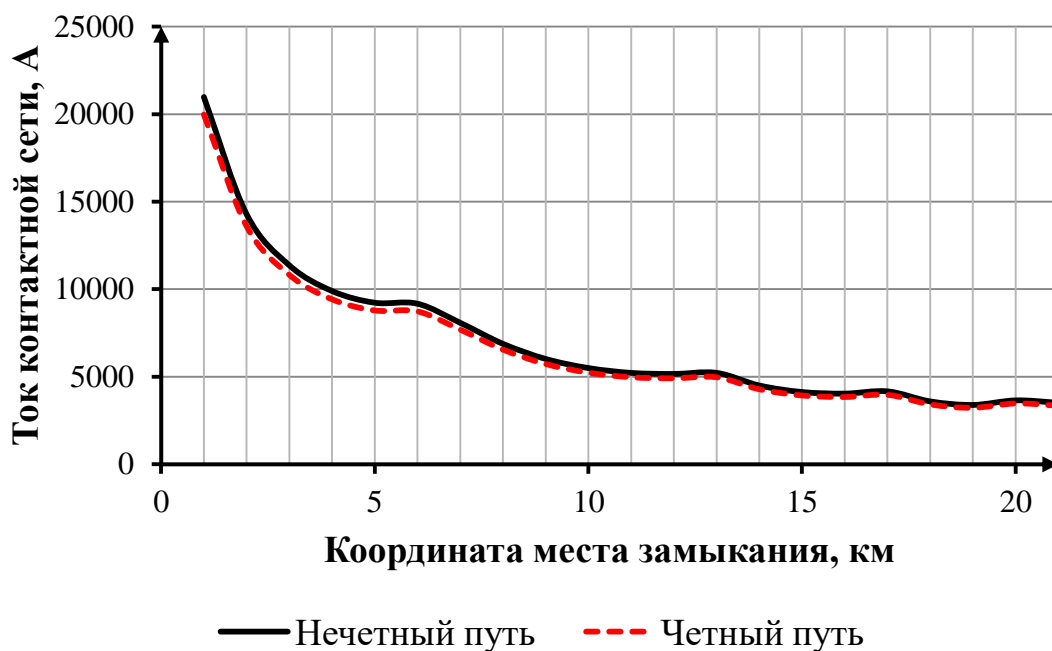


Рисунок Ж.16 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении заземляющего провода

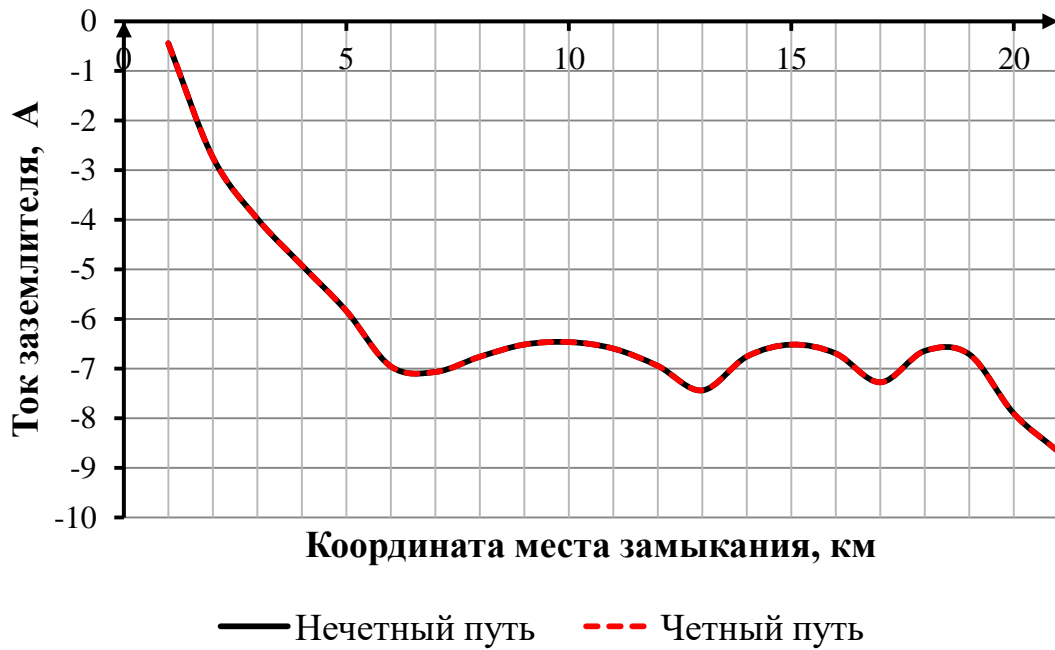


Рисунок Ж.17 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении заземляющего провода

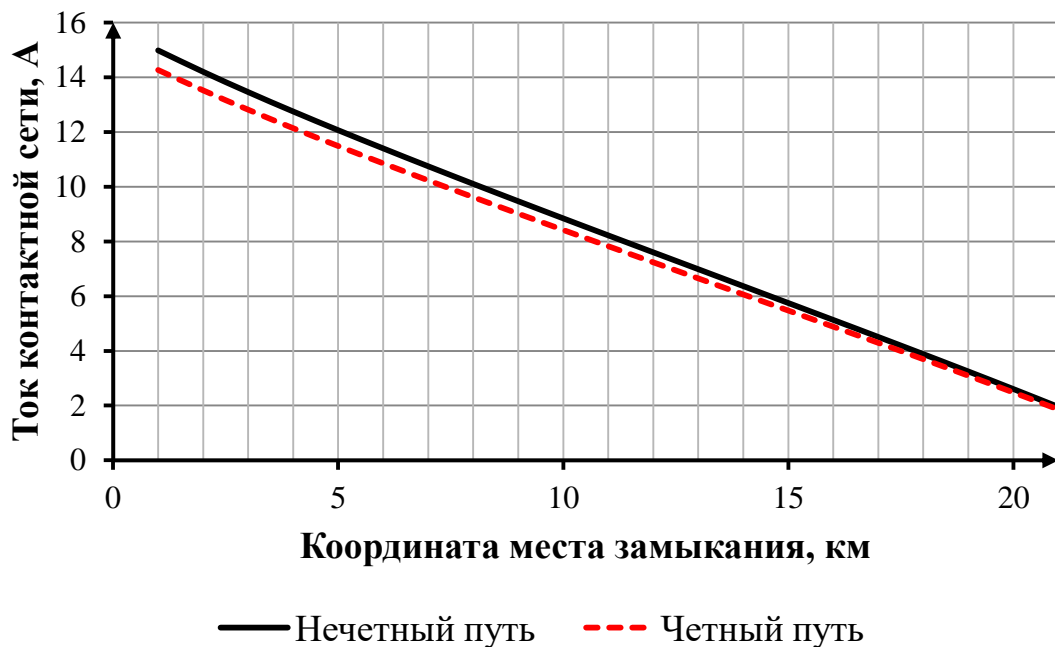


Рисунок Ж.18 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении заземляющего провода

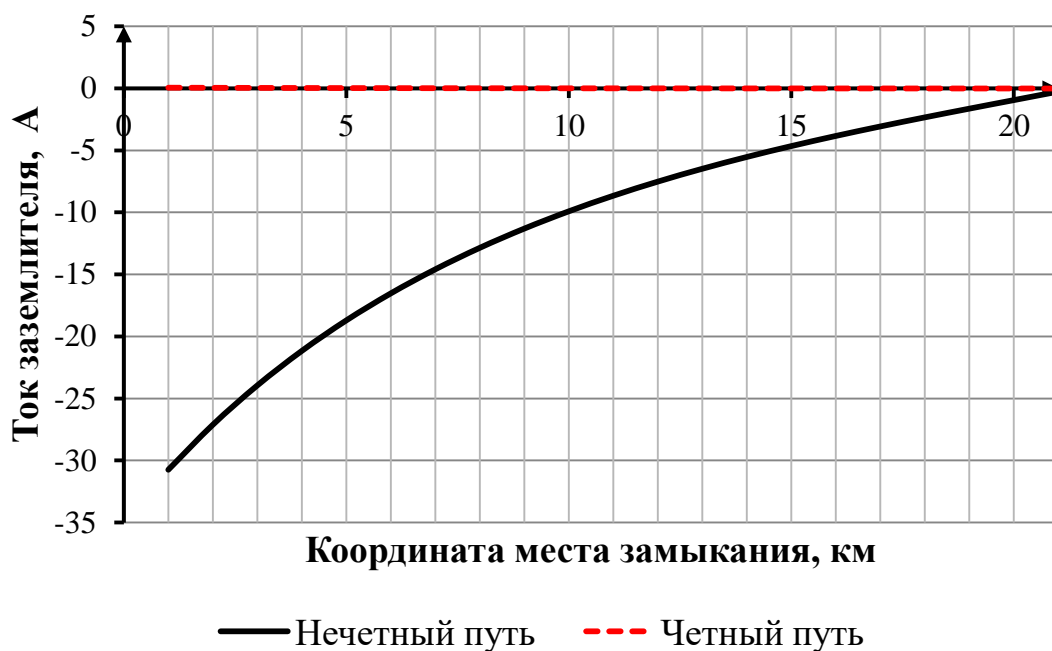


Рисунок Ж.19 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сарга» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении заземляющего провода

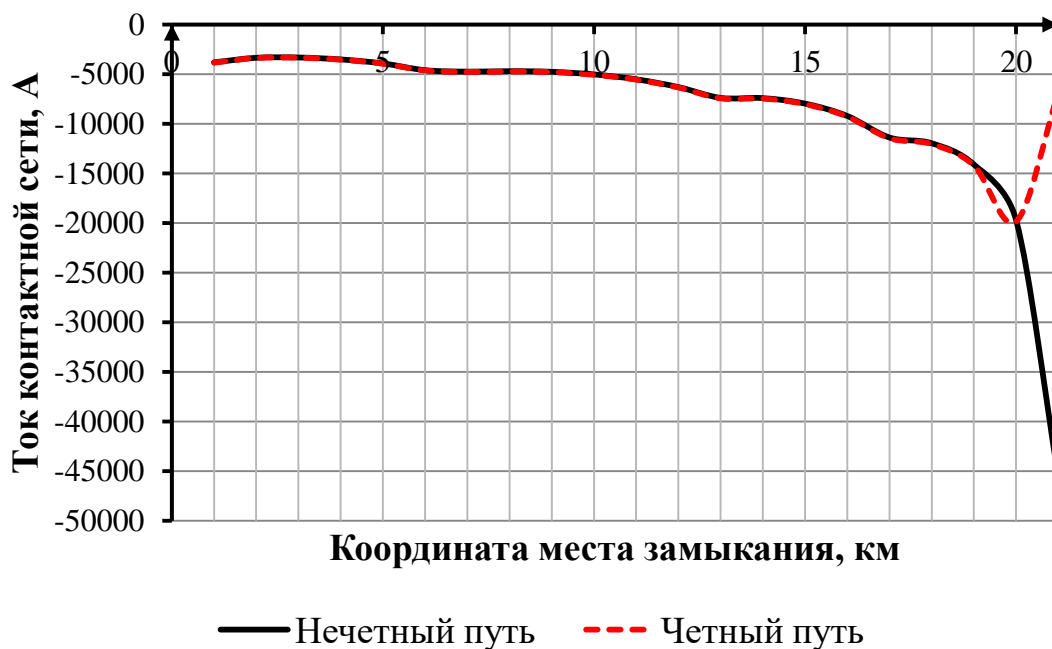


Рисунок Ж.20 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении заземляющего провода



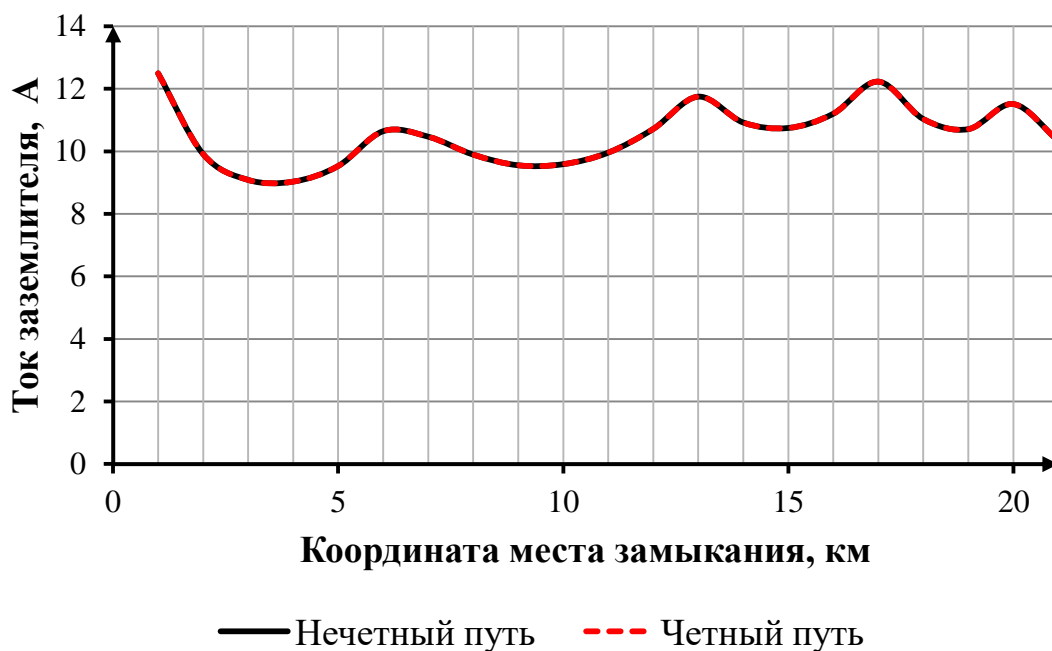


Рисунок Ж.21 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на рельсовую сеть нечетного пути при применении заземляющего провода

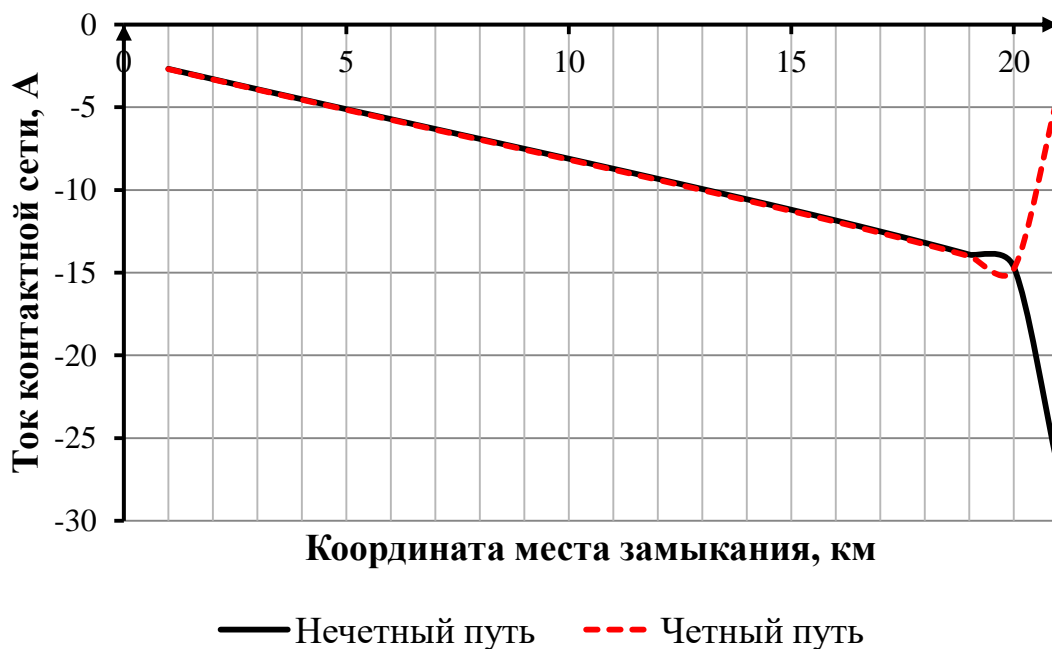


Рисунок Ж.22 –Зависимость тока фидеров контактной сети подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении заземляющего провода

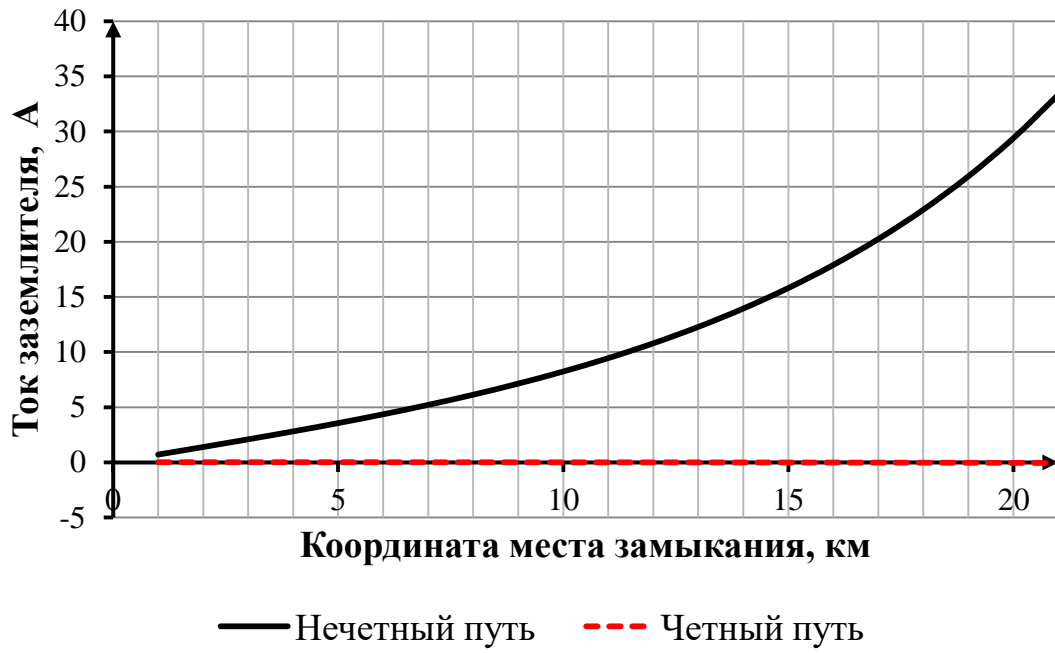


Рисунок Ж.23 –Зависимость тока протяженного заземлителя на подстанции «Сабик» нечетного и четного пути от координаты в режиме замыкания на заземлитель нечетного пути при применении заземляющего провода

ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2581619

УСТРОЙСТВО ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015100771

Приоритет изобретения 12 января 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 25 марта 2016 г.

Срок действия патента истекает 12 января 2035 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 581 619** <sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
H02H 3/00 (2006.01)  
B60M 5/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2015100771/07, 12.01.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.01.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.01.2015

(45) Опубликовано: 20.04.2016 Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: SU 1141026A1, 23.02.1985. RU 64151U1,  
27.06.2007. RU 2316873C1, 10.02.2008. DE  
2617644A1, 28.10.1976.

Адрес для переписки:

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,  
УрГУПС, ОДиА, Л.Б. Никулиной

(72) Автор(ы):

Кузнецов Константин Борисович (RU),  
Лесников Дмитрий Валентинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский государственный  
университет путей сообщения" (УрГУПС)  
(RU)(54) **УСТРОЙСТВО ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**(57) **Формула изобретения**

Устройство токовой защиты контактной сети постоянного тока, включающее устройство для заземления опор контактной сети, содержащее протяженный заземлитель, соединенный через поляризирующий диодный блок и дроссель-трансформатор рельсовой сети с рельсовым фидером тяговой подстанции постоянного тока, отличающееся тем, что в устройстве для заземления контактной сети между поляризирующим диодным блоком и дроссель-трансформатором рельсовой сети размещен датчик тока, выход которого соединен с программируемым блоком управления, выходом соединенным с быстродействующим выключателем контактной сети.

RU 2 581 619 C 1

RU 2 581 619 C 1



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170556

**УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ  
СЕТИ УЧАСТКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС) (RU)*

Авторы: *Кузнецов Константин Борисович (RU),  
Лесников Дмитрий Валентинович (RU)*

Заявка № 2016102266

Приоритет полезной модели 25 января 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 28 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 25 января 2026 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **170 556** (13) **U1**(51) МПК  
B60M 1/12 (2006.01)  
B60M 5/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016102266, 25.01.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
25.01.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.01.2016

(45) Опубликовано: 28.04.2017 Бюл. № 13

Адрес для переписки:

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,  
УрГУПС, ОДиА, Л.Б. Никулиной

(72) Автор(ы):

Кузнецов Константин Борисович (RU),  
Лесников Дмитрий Валентинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский государственный  
университет путей сообщения" (УрГУПС)  
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: SU 1141026 A1, 23.02.1985. RU  
64151 U1, 27.06.2007. RU 2124212 C1,  
27.12.1998. JP H07266936 A, 17.10.1995.(54) **УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ УЧАСТКОВ ПОСТОЯННОГО  
ТОКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

(57) Формула полезной модели

Устройство заземления опор контактной сети участков постоянного тока железнодорожных станций, включающее протяженный заземлитель, поляризованный диодный блок, быстродействующий выключатель, отличающееся тем, что протяженный заземлитель выполнен в виде металлического троса, размещенного с полевой стороны опор контактной сети над поверхностью земли, соединенного через поляризирующий диодный блок с отрицательным полюсом тяговой подстанции, причем между поляризирующим диодным блоком и отрицательным полюсом размещен датчик тока, выход которого соединен с программируемым блоком управления, выходом соединенного с быстродействующим выключателем контактной сети.

RU 170556 U1

RU 170556 U1



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 175748

**УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ  
СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ  
КОМБИНИРОВАННОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный университет путей сообщения" (УрГУПС) (RU)*

Авторы: *Кузнецов Константин Борисович (RU),  
Лесников Дмитрий Валентинович (RU)*

Заявка № 2017110564

Приоритет полезной модели 29 марта 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 18 декабря 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 29 марта 2027 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **175 748** (13) **U1**(51) МПК  
B60M 5/00 (2006.01)  
B60M 3/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2017110564, 29.03.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
29.03.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.03.2017

(45) Опубликовано: 18.12.2017 Бюл. № 35

Адрес для переписки:

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,  
УрГУПС, ОДиА, Л.Б. Никулиной

(72) Автор(ы):

Кузнецов Константин Борисович (RU),  
Лесников Дмитрий Валентинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский государственный  
университет путей сообщения" (УрГУПС)  
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2581619 C1, 20.04.2016. RU  
64151 U1, 27.06.2007. RU 2085414 C1,  
27.07.1997. JP H07266936 A, 17.10.1995. CN  
103178363 A, 26.06.2013.**(54) УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО  
ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ**

(57) Формула полезной модели

Устройство заземления опор контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока с применением комбинированного заземлителя, включающее заземлитель, поляризующий диодный блок, датчик тока, быстродействующий выключатель, отличающееся тем, что заземлитель выполнен комбинированным, состоящим из вертикальных стержней, расположенных с полевой стороны опор контактной сети на равномерном расстоянии друг от друга, и металлического провода, расположенного над землей с полевой стороны опор контактной сети, причем вывод каждого вертикального стержня соединен с металлическим проводом, а металлический провод присоединен через поляризующий диодный блок и датчик тока к «минус» шине тяговой подстанции, при этом датчик тока через программируемый блок управления соединен с быстродействующим выключателем.

RU  
175748  
U1RU  
175748  
U1

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ТРАНСЭНЕРГО  
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ  
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ**

ул. Челюскинцев, 116,  
г. Екатеринбург, 620013,  
Тел.: (343) 358-48-23, факс: (343) 358-57-27,  
E-mail: Nees@svrw.ru

«14» июня 2018 г. №ИСХ-3014/СВЕРДНТЭ

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**АКТ**

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы**

1. Разработчики: Лесников Дмитрий Валентинович, Кузнецов Константин Борисович.
2. Предмет внедрения: методика расчета распределения потенциалов и токов в элементах обратной тяговой сети постоянного тока с учетом проводимости земли и подземных металлических сооружений.
3. Место внедрения: Свердловская железная дорога, филиал ОАО «Российские железные дороги», Свердловская дирекция по энергообеспечению, Дорожная электротехническая лаборатория.
4. Технико-экономический эффект: предложенная методика учитывает при расчетах распределения потенциалов и токов в элементах тяговой сети параметры тяговых подстанций, расположение постов секционирования и пунктов параллельного соединения, наличие междупутных соединителей рельсовой сети, неоднородность рельсовой сети, изменение удельного сопротивления грунта вдоль оси пути, наличие и неоднородность подземных металлических сооружений. Методика позволяет рассчитывать нормальный и аварийный режимы работы электрифицированных участков постоянного тока, что способствует выявлению «узких мест» в конструкции обратной тяговой сети.
5. Дата внедрения 13.06.2018г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применять указанную методику при расчете элементов обратной тяговой сети

Начальник дирекции

Начальник электротехнической  
лаборатории



О.В.Халуев

И.А.Пятецкий