

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

*На правах рукописи*

**Муратова-Милехина Анна Сергеевна**

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ  
ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и  
электрификация»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
А. Л. Быкадоров

Ростов-на-Дону

2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Проблема определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока.....	10
1.1 Анализ известных способов и технических средств определения места короткого замыкания в тяговой сети.....	10
1.2 Неоднородности структуры тяговых сетей переменного тока.....	20
1.3 Выводы по главе и задачи повышения достоверности определения места короткого замыкания.....	25
2 Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на параметры петли короткого замыкания.....	26
2.1 Постановка задачи.....	26
2.2 Влияние сопротивления дуги на параметры петли короткого замыкания.....	27
2.2.1 Одностороннее питание однопутного участка.....	27
2.2.2 Двустороннее питание однопутного участка.....	29
2.3 Влияние сопротивления взаимоиндукции на параметры петли короткого замыкания.....	34
2.3.1 Одностороннее питание двухпутного участка.....	34
2.3.2 Двустороннее питание двухпутного участка.....	37
2.4 Исследование влияния схемы питания на параметры петли короткого замыкания.....	41
2.5 Выводы по главе.....	43
3 Компьютерное моделирование тяговой сети переменного тока.....	44
3.1 Постановка задачи.....	44
3.2 Математический аппарат и программные средства моделирования.....	45
3.3 Исследование эффективности детализации элементов структуры тяговой сети при моделировании однопутного участка с односторонним питанием.	51
3.3.1 Моделирование элементов инфраструктуры тяговой сети рельсы-земля.....	51

3.3.2 Моделирование тросов группового заземления.....	57
3.3.3 Моделирование износа контактного провода.....	59
3.4 Исследование эффективности детализации элементов структуры тяговой сети при моделировании двухпутного участка с двусторонним питанием...	60
3.4.1 Моделирование элементов структуры тяговой сети рельсы-земля.....	60
3.4.2 Влияние сезона на параметры петли короткого замыкания.....	69
3.4.3 Влияние уширения междупутья на параметры петли короткого замыкания.....	70
3.5 Исследование влияния токов короткого замыкания на удельное сопротивление рельсовой цепи.....	71
3.6 Моделирование неоднородности тяговой сети с ЭУП.....	76
3.7 Выводы по главе.....	82
4 Предлагаемый метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока.....	84
4.1 Постановка задачи.....	84
4.2 Теоретические основы предлагаемого метода.....	84
4.2.1 Математическое обоснование.....	84
4.2.2 Порядок формирования матрицы [M].....	87
4.3 Способ определения места короткого замыкания методом «С».....	89
4.4 Оценка погрешности предлагаемого метода «С».....	92
4.4.1 Характеристика участка, на котором проводился эксперимент.....	92
4.4.2 Характеристика и учет параметров системы внешнего электроснабжения участка Старая Станица – Сысоево.....	94
4.4.3 Расчет параметров короткого замыкания.....	99
4.4.4 Определение места короткого замыкания по результатам первого эксперимента на 998 км на опоре №242.....	100
4.4.5 Определение места короткого замыкания по результатам второго эксперимента на 1001, 3 км на опоре №352.....	101
4.4.6 Определение места короткого замыкания по результатам третьего эксперимента на 1001, 5 км на опоре №360.....	102

4.4.7 Оценка влияния параметров внешней системы электроснабжения на погрешность определения до места КЗ по результатам эксперимента.....	103
4.6 Проблема учета влияния токовой нагрузки электровозов на точность определения места короткого замыкания.....	105
4.5 Выводы по главе.....	108
Заключение.....	109
Библиографический список.....	111
Приложение 1	
Зависимости параметров сопротивления петли короткого замыкания в результате имитационного компьютерного моделирования тяговой сети переменного тока.....	123
Приложение 2	
Условия и порядок проведения эксперимента на участке Старая Станица - Погорелово.....	140
Приложение 3	
Акт о проведении эксперимента и результаты диагностики СДПП.....	146
Приложение 4	
Документы патента.....	151
Приложение 5	
Акт внедрения.....	153

## Введение

**Актуальность проблемы.** Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года направлена на достижение параметров экономической эффективности, функциональной безопасности и устойчивости отечественного железнодорожного транспорта за счёт внедрения инновационных технологий в области эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Для достижения этой цели планируется разработка новых технических решений, использование высокоточных систем моделирования элементов инфраструктуры на базе широкого использования современных средств вычислительной техники и информационных технологий.

Для эффективного управления перевозочным процессом на электрифицированных железных дорогах энергодиспетчерский аппарат должен получать достоверную информацию об оперативной обстановке на перегоне. Это требование имеет особое значение при возникновении аварийных ситуаций, при которых нарушается движение поездов. Такая ситуация возникает, например, при устойчивом коротком замыкании в тяговой сети. Короткое замыкание является серьезной аварией, влекущей за собой вынужденный простой поездов. На поиск места короткого замыкания тратится от нескольких минут до нескольких часов, а на устранение повреждения требуется дополнительное время. Чем быстрее и точнее будет определено места короткого замыкания в контактной сети перегона, тем быстрее будет восстановлен график движения поездов. Это имеет особое значение при высокоскоростном и тяжеловесном движении. В течение более полувека проводится разработка теоретических методов и средств определения места короткого замыкания. За этот период времени выполнено и продолжает выполняться большое количество теоретических и практических исследований, издано много научных публикаций на эту тему. Это свидетельствует о сложности, практической значимости и актуальности проблемы определения удалённости короткого замыкания в тяговой сети.

Значительный вклад в теорию и практику решения проблемы определения

места короткого замыкания в тяговой сети внесли работы, выполненные Фигурновым Е.П., Самсоновым Ю.Я., Пупыниным В.Н., Зимаковым В.А., Сухопрудским С.Д., Овласюком В.Я., Корсаковым Г.М., Жарковым Ю.И., Бочевым А.С., Косаревым Б.И., Косаревым А.Б., Германом Л.А., Дынькиным Б.Е., Быкадоровым А.Л., Кузнецовым В.В., Поповой Н.А., Петровой Т.Е., Петровым И.П. Стороженко Е.А. и другими авторами.

Имеются значительные теоретические достижения в этой области знаний. Самыми важными из них являются аналитические методы определения расстояния до места короткого замыкания, которые могут в той или иной степени учитывать схемы питания, сопротивление дуги и переходное сопротивление рельсы-земля. При этом использовались сложные аналитические преобразования и с целью упрощения недостаточно учитывались неоднородности структуры тяговой сети. Эти упрощения влияют на точность определения места короткого замыкания.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка метода, обеспечивающего повышенную точность определения места короткого замыкания на основе учёта неоднородностей в структуре тяговой сети и влияния дуги на параметры петли короткого замыкания.

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

1. Анализ существующих методов и средств определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока.
2. Обозначение неоднородностей в структуре тяговой сети, которые могут потенциально влиять на погрешность при определении места повреждения.
3. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети и дуги на параметры петли короткого замыкания.
4. Разработка детализированной компьютерной модели тяговой сети и выбор математического аппарата модели, который позволит рассчитывать схемы питания тяговой сети сложной конфигурации.
5. Сравнительный анализ влияния неоднородностей структуры тяговой сети, дуги, схем питания и степени их детализации на погрешность при определении места короткого замыкания.

6. Разработка и математическое обоснование метода определения места короткого замыкания, учитывающего неоднородности структуры тяговой сети.

7. Оценка погрешности предлагаемого метода определения места короткого замыкания.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, анализа электрических сетей, теории распознавания образов, матричного анализа и численные методы расчёта в интерактивной среде Matlab.

**Достоверность научных положений и выводов.** Изложенные в работе основные положения, выводы и рекомендации подтверждены строгостью теоретического обоснования, сопоставлением результатов расчета на компьютерной модели с известными теоретическими положениями, со справочными данными, с результатами экспериментальных исследований на действующем участке железной дороги.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.**

1. Разработан и теоретически обоснован способ определения удаленности места короткого замыкания в тяговой сети, позволяющий учитывать её неоднородности и переходное сопротивление дуги, на который получен патент.

2. Разработана компьютерная модель тяговой сети переменного тока, которая обладает высокой степенью детализации элементов контактной сети, рельсовой цепи, встречающихся неоднородностей и различных схем питания.

3. Разработан алгоритм реализации метода определения места короткого замыкания, содержащий структурную схему, новый способ определения удаленности места короткого замыкания и предложения по использованию существующих технических средств его реализации.

**Практическая ценность работы.** Выполнены теоретические исследования, на базе которых разработана компьютерная модель тяговой сети переменного тока, позволяющая рассчитывать схемы тяговой сети, имеющие высокую степень

детализации. Разработан метод, содержащий способ и алгоритм его использования, который позволяет с повышенной точностью определять удаленность места устойчивого короткого замыкания на базе средств АРМ энергодиспетчера.

#### **На защиту выносятся.**

1. Метод определения места короткого замыкания, учитывающий неоднородности тяговой сети и переходное сопротивление дуги.
2. Способ и алгоритм практической реализации метода определения места короткого замыкания.
3. Детализированная компьютерная модель, учитывающая неоднородности структуры тяговой сети.
4. Результаты исследований влияния неоднородности структуры тяговой сети на точность определения места короткого замыкания.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2009», «Транспорт-2012», (Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, 2009, 2012гг.);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт–2013», «Транспорт–2014». Технические науки. (Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, 2013, 2014гг.);

– на VII Международной научно-практической конференции Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2014» (Днепропетровский университет железнодорожного транспорта - г. Днепропетровск, 2014 г.);

– на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России». (Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, 2015 г.);

– на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2016», «Транспорт-2018», (Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, 2016, 2018 гг.).



**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 – в изданиях, входящих в список ВАК. Получен патент на изобретение №. №2566458 «Способ определения места короткого замыкания контактной сети электрифицированного транспорта».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературных источников и приложений. Работа содержит 154 страницы основного текста, в том числе 81 рисунок и 7 таблиц, 110 литературных источников и 5 приложений на 31 странице.

# **1 Глава – Проблема определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока**

## **1.1 Анализ известных способов и технических средств определения места короткого замыкания в тяговой сети**

Короткие замыкания в контактной сети могут быть вызваны различными факторами и в большинстве случаев точно установить причину не удастся.

Короткие замыкания контактной сети называются преходящими, если они возникают вследствие загрязнения изоляции пылью и солями, перекрытия изоляторов птицами, касания негабаритными грузами. На Федеральных железных дорогах Австрии в 2016 году общее число коротких замыканий составило примерно 3950 [11]. Последствия таких замыканий устраняются быстро средствами АПВ.

По ряду причин (разрушение изоляции на подвижном составе, изолирующих конструкций контактной сети и др.) наблюдаются так называемые устойчивые, «глухие» короткие замыкания, которые после прерывания тока не исчезают. Устойчивое короткое замыкание (КЗ) в тяговой сети железной дороги является аварией, влекущей за собой вынужденный простой поездов. Приблизительное количество устойчивых коротких замыканий на каждой фидерной зоне по данным СКЖД составляет 4-5 в год. На поиск места короткого замыкания тратится от нескольких минут и до нескольких часов, а на устранение повреждения требуется еще дополнительное время. Сокращение времени на поиск места устойчивого короткого замыкания является актуальной задачей, так как влияет на выполнение графика движения поездов. При высокоскоростном движении это имеет особое значение.

Методы определения места короткого замыкания (ОМП) в линиях электропередач и тяговых сетях делятся, в основном, на топографические и дистанционные [1-12], классификация которых приведена на рисунке 1.1.

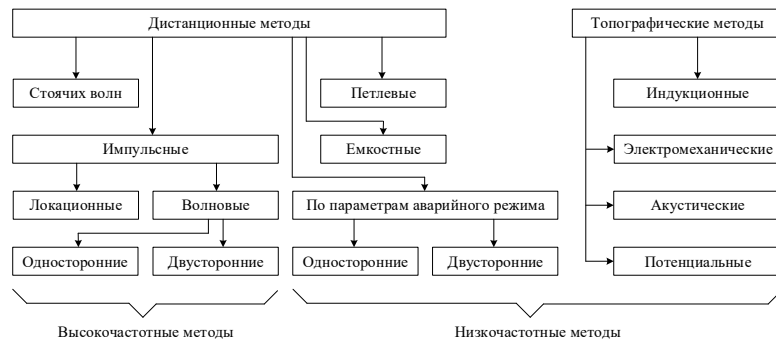


Рисунок 1.1 – Классификации методов ОМП в линиях электропередач

Наиболее приемлемыми для тяговых сетей переменного тока являются дистанционные методы. Попытка создать определитель места повреждения на основе дистанционного волнового метода была предпринята Г.М. Левиным в 1966 г. [9,10]. Попытка оказалась неудачной, поскольку посылаемый в контактную сеть высокочастотный зондирующий импульс многократно отражался от элементов контактной сети и токоприемников электровозов, что приводило к большой ошибке.

Развитие этого направления начало развиваться лишь в настоящее время в связи с появлением оптоволоконных технологий [11]. Для определения места короткого замыкания в тяговой сети Австрийская компания Frauscher исследует технологию распределенного акустического зондирования волоконно-оптического кабеля, проложенного параллельно железнодорожным путям («Технология DAS»). Эта технология позволяет регистрировать и анализировать деформации волоконно-оптического кабеля, вызванные акустическими сигналами, сопровождающими короткое замыкание.

Зондирование места короткого замыкания осуществляется лазерными импульсами, которые передаются по кабелю и возвращаются в виде рассеянного света. Принятый сигнал анализируется специальной аппаратурой с выделением частотного спектра, характерного для короткого замыкания. Место и время короткого замыкания определяются по пику V-образного сигнала.

Предполагается, что место короткого замыкания может быть определено этим методом с точностью 10 м. Однако, на результаты измерений могут влиять

более 20 параметров: энергоемкость короткого замыкания; расстояние от дуги до волоконно-оптического кабеля; окружающий шум (дождь, ветер, проходящие поезда и т. д.).

Проблема определения места короткого замыкания является одной из многих проблем, которую будет решать «Технология DAS» на железной дороге. Исследование технологии DAS в настоящее время происходит на железных дорогах Германии (FOS - Fiber Optic Sensing), США (BNSF, компания OptaSense), Японии (компания JR East).

«Технологию DAS» не выгодно использовать для решения отдельной проблемы. Её реализация будет выгодна лишь при решении комплекса проблем на железной дороге, что связано с большими капитальными вложениями.

На практике при устойчивых КЗ повреждения отыскивают поочередным отключением продольных разъединителей, которыми контактная сеть разделена на участки (секции), и последующим опробованием контактной сети включением фидерного выключателя [94], рисунок 1.2.

В [94] предложен способ, который снижает износ силового оборудования и уменьшает время поиска повреждения. В основу способа положен контроль уровня наведённого напряжения в поврежденной отключённой линии от соседнего пути и линии продольного электроснабжения ДПР.

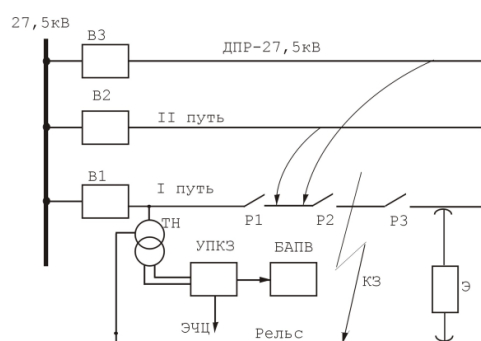


Рисунок 1.2 – Структурная схема поиска повреждения в контактной сети

Величину наведённого напряжения контролирует устройство автоматизации поиска короткого замыкания (УПКЗ), которое по величине наведённого напряжения устанавливает повреждённую секцию. Точность этого метода зависит от длины секций. По этой причине в [94] также отмечается, что

создание дистанционного способа определения места повреждения (ОМП) облегчит и ускорит поиск места КЗ. При этом УПКЗ останется вспомогательным средством для контроля исправности линии после устранения повреждения перед подачей напряжения.

Наиболее приемлемыми для тяговых сетей переменного тока являются дистанционные методы, анализирующие место повреждения по параметрам аварийного режима. Эти методы наиболее полно учитывают специфику тяговых сетей и потребителей энергии, связанных с контактной сетью через токоприёмники.

В основу самого раннего метода дистанционного определения места повреждения по параметрам режима короткого замыкания «метод Z», разработанного Фигурновым Е.П. и Самсоновым Ю.Я. [12-14], был заложен принцип измерения полного сопротивления петли КЗ. На его основе были созданы прибор определения места повреждения (ОМП) типа УКЗН.

Принцип этого метода заключался в автоматическом измерении напряжения и тока поврежденного фидера и определении их отношения:

$$l_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\phi} z_{\text{ТС}}}, \quad (1.1)$$

где  $l_{\text{КЗ}}$  – расстояние от тяговой подстанции до места КЗ, км;

$U_{\text{ш}}$  – напряжение на шинах подстанции, В;

$I_{\phi}$  – ток поврежденного фидера, А;

$z_{\text{ТС}}$  – полное удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

Недостатком метода является слишком большая неточность определения расстояния до места КЗ, достигающая нескольких километров.

Дальнейшие исследования на основе этого метода были продолжены во ВНИИЖТе (В.А. Зимаков, С.Д. Сухопрудский, В.Я. Овласюк, Г.М. Корсаков др.) [15-19]. Конструкции ОМП, разработанные ВНИИЖТом (ОМП-68, ОМП-71, ОМП-73, УКЗН, Лисна), были включены в систему телемеханики. Однако, желаемых результатов не было достигнуто из-за низкой точности определения

места повреждения. Совершенствованием конструкций устройств типа ОМП и методики их использования занимались Е.П. Фигурнов, Ю.И. Жарков, А.С. Бочев, В.В. Кузнецов, М.Ю. Тупченко и другие [20-23].

С появлением системы электроснабжения 2x25 кВ были предложены методы [24-30], учитывающие специфику этой системы. В этих методах при КЗ фиксируются токи подстанций  $I_A$ ,  $I_B$  и напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ , а затем вычисляются отношения  $Z_A = U_A / I_A$ ,  $Z_B = U_B / I_B$ ,  $Z_A / (Z_A + Z_B)$  и  $Z_B / (Z_A + Z_B)$ , по которым определяется расстояния до места короткого замыкания. В результате проведенных исследований оказалось, что полученные соотношения на некоторых участках нелинейно зависят от расстояния до места повреждения.

Дальнейшее развитие идеи этого метода получено в работе [31-33]. Было предложено в момент короткого замыкания измерять токи двух подстанций  $I_{KA}$  и  $I_{KB}$  и вычислять отношение  $I_{KA} / (I_{KA} + I_{KB})$  или  $I_{KB} / (I_{KA} + I_{KB})$ , по значению которых судить об удаленности места короткого замыкания. Однако, вследствие нелинейного характера этих отношений и влияния уравнительного тока погрешность при этом методе может достигать 1,25 км.

Н.А. Поповой был исследован «метод X» [34,35], основанный на зависимости индуктивного сопротивления от расстояния до места повреждения:

$$I_{K3} = \frac{U_{III} \sin \varphi}{I_{\phi} x_{TC}}, \quad (1.2)$$

где  $\sin \varphi$  – фазовый угол между током  $I_{\phi}$  и напряжением  $U_{III}$ ;

$x_{TC}$  – индуктивная составляющая удельного сопротивления  $z_{TC}$  тяговой сети, Ом/км.

Этот метод давал хороший результат только при одностороннем питании контактной сети, так как при этом отсутствует влияние дуги, имеющей активное сопротивление. При двустороннем и узловом питании на точность метода существенно влияет сопротивление дуги. Погрешность этого метода меньше чем метода Z, но при двустороннем питании она может достигать значений более километра.

Большой вклад в разработку идей и методов определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока внесён Е.П. Фигурновым, имеющим более 30 публикаций и патентов на изобретение по этой тематике [36-57], выполнявшейся в разное время совместно с Ю.И. Жарковым, Д.Е. Стороженко, Т.Е. Петровой, И.П. Петровым. Предложение применять индуктивно развязанные схемы замещения тяговой сети дало возможность с новых позиций оценить уже имеющиеся методы и разработать новые методы [58-63]. Этому способствовало развитие вычислительной техники и цифровых методов измерений.

Существенным успехом в разработке методов определения места короткого замыкания является появление методов, учитывающих сопротивление дуги. Эти методы, являющиеся развитием и уточнением метода X, получили названия ОМП-X1 и ОМП-X2 (Е.П. Фигурнов, Ю.И. Жарков, Д.Е. Стороженко, Т.Е. Петрова, И.П. Петров).

В методе ОМП-X1 в отличие от метода X учтено, что ток в рельсах отличается от тока в контактной сети на участках с числом путей два и более. Для учёта этого дополнительно введено измерение тока плеча  $I_A$ . Кроме того, здесь впервые применено удельное индуктивное сопротивление рельсовой цепи с учётом утечки токов  $x'_{p,mv}$ . Расстояние до места короткого замыкания предложено вычислять по формуле

$$l_k = \frac{U_A \sin(\varphi_1 - \delta_1)}{I_1 x_{-1,n} + I_A x'_{p,mv}}, \quad (1.3)$$

где  $l_k$  – расстояние от подстанции до места КЗ;

$x_{-1,n}$  – удельное индуктивное сопротивление рельсовой цепи по справочным данным;

$\delta_1$  – дополнительный угол, град эл.

Дополнительный угол  $\delta_1$  введён для уменьшения погрешности при близких коротких замыканиях и больших переходных сопротивлениях.

Недостатками формулы (1.3) являются: во-первых, использование приближённого значения  $\alpha_{AI} \approx \alpha_{AU} + \varphi_1$  (рисунок 1.3); во-вторых, вычисления по

формуле (1.3) необходимо выполнять методом последовательных приближений, так как коэффициент  $\nu$  в сопротивлении  $x'_{p,m\nu}$  зависит от места КЗ.

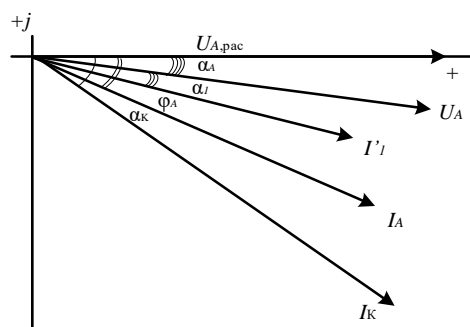


Рисунок 1.3 – Векторная диаграмма измеряемых параметров в момент КЗ

В методе ОМП-Х2, в отличие от ОМП-Х1, не требуется измерение токов фидеров смежных путей. Расчётная формула расстояния до места КЗ в методе ОМП-Х2 имеет следующий вид:

$$l_K = \frac{U_A e^{j(\varphi_1 - \alpha_A)} - I_K R_D e^{j(\delta_A - \alpha_D - \alpha_N)}}{I'_1 z_{\Sigma}}, \quad (1.4)$$

$$R_D = \frac{U_A \sin(\varphi_1 - \alpha_A)}{I_K \sin(\delta_A - \alpha_D - \alpha_N)}, \quad (1.5)$$

где  $l_K$  – расстояние от подстанции до места КЗ;

$U_{A,расч}$  – напряжение холостого хода подстанции А;

$U_A$  – напряжение на шинах подстанции А;

$R_D$  – сопротивление дуги;

$I'_1$  – ток левого плеча питания межподстанционной зоны;

$I'_1$  – ток фидера с повреждённой контактной сетью;

$I_K = I_A + I_B$  – ток короткого замыкания;

$\varphi_1$  – угол между током  $I'_1$  и напряжением  $U_A$ ;

$\alpha_A$  – угол между напряжением  $U_{A,XX}$  и  $U_A$ ;

$\alpha_K$  – угол между током  $I_K$  и напряжением  $U_{A,XX}$ ;

$z_{\Sigma}$  и  $\alpha_{\Sigma}$  – модуль и аргумент удельного сопротивления  $z_{\Sigma}$  петли короткого замыкания;



$D_A, \delta_A$  – модуль и аргумент комплекса  $\underline{D}_A$  ;

$N, \alpha_N$  – модуль и аргумент комплекса  $N$ ,

$$N = \frac{I'_1}{I_K} D_A = N_D + N_M; \quad \alpha_N = \arctg \frac{N_M}{N_D}.$$

Дополнительный угол  $\delta_A$  введён для уменьшения погрешности при близких КЗ и больших переходных сопротивлениях. Параметр  $N$  введён для упрощения, так как это освобождает от необходимости измерения токов смежных путей.

Для определения  $l_K$  необходимо в момент КЗ измерить параметры петли короткого замыкания  $U_A, I'_1, \varphi_1$ . Затем вычислить углы  $\alpha_\varepsilon, \delta_A, \alpha_N$  и модуль эквивалентного удельного сопротивления  $z_\varepsilon$  (рисунок 1.3). Полученные параметры необходимо использовать для вычисления  $R_D$  и расстояния до места повреждения  $l_K$ .

Недостатки: - векторная диаграмма рисунка 1.3 наглядно демонстрирует большое количество углов, которые необходимо иметь для вычисления сопротивления дуги; - параметры  $\alpha_\varepsilon, \alpha_N, \delta_A$  и  $z_\varepsilon$  зависят от  $l_K$ , поэтому расстояние до места короткого замыкания вычисляется методом последовательных приближений с учётом схемы питания.

Среди современных технических средств, имеющих функцию определения места короткого замыкания, следует отметить интеллектуальный терминал питающей линии тяговой сети 27,5 кВ ИнТер-27,5-ФКС (рисунок 1.4) разработки ООО НИИЭФА-ЭНЕРГО [66,67].



Рисунок 1.4. Интеллектуальный терминал 27,5 кВ, ИнТер-27,5-ФКС

Его устанавливают на каждом питающем присоединении. Он имеет последовательный интерфейс RS-232 для подключения к ЭВМ и два независимых интерфейса RS-485 для связи с АСУ.

Терминал реализует функцию определения места повреждения (ОМП) в контактной сети путем оперативного вычисления расстояния до места короткого замыкания по результатам измерения параметров петли короткого замыкания с последующим вычислением индуктивной составляющей. Для конкретного участка предварительно определяются параметры контактной сети по результатам проведения опытных КЗ по специальной методике. На рисунке 1.5. представлены схемы для проведения двух опытных КЗ. Определение реальных параметров тяговой сети на однопутном участке выполняется только по схеме рисунка 1.5(а), на двухпутном участке используются обе схемы рисунка 1.5.

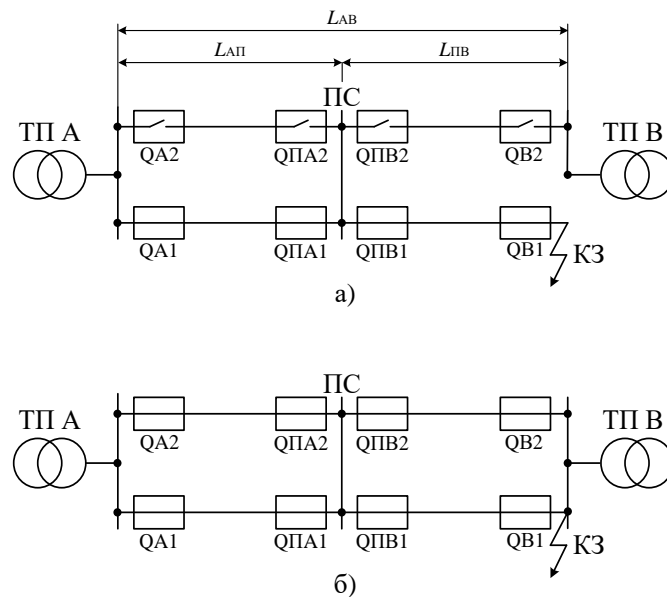


Рисунок 1.5 – Схема опытного определения параметров контактной сети с учётом взаимного влияния второго пути

На рисунке 1.5 введены следующие обозначения:

ТП А – тяговая подстанция, на которой производится проверка устройства ИнТер-27,5-ФКС;

QA1 – выключатель, которым управляет проверяемое устройство ИнТер-27,5-ФКС;

QA2 – выключатель смежного пути;

QПА1, QПА2, QПВ1, QПВ2 – выключатели поста секционирования;

ТП В – смежная тяговая подстанция;

QВ1 и QВ2 – выключатели ТП В.

По данным первого эксперимента при отключённом смежном пути (схема рисунка 1.5,а) в момент КЗ фиксируется модуль полного сопротивления петли КЗ –  $Z_1$  и фазовый угол  $\varphi_1$ .

Второе опытное КЗ проводится для двухпутного участка с целью определения параметров тяговой сети при наличии тока смежного пути (рисунок 1.5, б). При этом фиксируется второе значение модуля полного сопротивления петли КЗ –  $Z_2$  и фазовый угол  $\varphi_2$ .

По данным первого опыта вычисляется погонное индуктивное сопротивление тяговой сети [66]:

$$x_0 = Z_1 \sin \varphi_1 / L_{AB}, \quad (1.6)$$

где  $L_{AB}$  – расстояние до места КЗ в момент эксперимента.

Результаты этого эксперимента справедливы для схем однопутного и двухпутного участков рисунка 1.5.

По данным второго эксперимента вычисляется коэффициент взаимного реактивного сопротивления смежных контактных подвесок двухпутного участка по формуле

$$M_X = (X_2 - X_1) / X_1, \quad (1.7)$$

где  $X_1 = Z_1 \sin \varphi_1$ ,  $X_2 = Z_2 \sin \varphi_2$ .

В момент реальной аварии аппаратура ИнТер-27,5-ФКС фиксирует параметры петли короткого замыкания с индуктивным сопротивлением  $X_{КЗ}$ . По величине этого сопротивления расстояние до места КЗ  $L_{КЗ}$  рекомендовано рассчитывать по формуле:

$$L_{КЗ} = X_{КЗ} / x_0. \quad (1.8)$$

Недостатками данного метода являются:

1. При проведении опытного КЗ погонное сопротивление  $x_0$  определяется без дуги и рекомендовано к применению при двустороннем питании. Однако при реальных КЗ с дугой и двустороннем питании расчёты по формуле (1.11) будут давать погрешность, так как дуга при двустороннем питании влияет на  $x_0$ .

2. Погонное сопротивление  $x_0$ , вычисленное по формуле (1.10), представляет среднюю величину, в которой нивелированы реальные места расположения неоднородных элементов тяговой сети вдоль пути, что при расчёте  $L_{КЗ}$  по формуле (1.11) будет также создавать погрешность.

## **1.2 Неоднородности структуры тяговых сетей переменного тока**

Недостатком всех рассмотренных в разделе 1.1 методов определения места короткого замыкания является использование однородных или частично однородных расчётных моделей тяговой сети переменного тока.

Реально тяговая сеть железных дорог переменного тока представляет сложную неоднородную электрическую цепь, содержащую ряд проводников тягового тока: провода контактной сети, питающие, экранирующие, отсасывающие линии и рельсы, шпалы, балластная призма и земля. Контактная сеть и рельсы вместе с землёй образуют взаимосвязанные электромагнитные контуры. На многопутных участках электромагнитные связи элементов тяговой сети обоих путей оказываются достаточно сложными.

Проблема моделирования тяговой сети впервые появилась в связи с необходимостью расчёта сопротивления тяговой сети. Наибольшую сложность в исследованиях представляло моделирование рельсовой цепи. Математические модели, сохранившиеся до настоящего времени, построены на принципе однородности электрических параметров тяговой сети на всём протяжении [71,75]. Впервые метод расчёта неоднородных тяговых сетей переменного тока был предложен в [103]. Однако, в этом методе расчёт неоднородных тяговых сетей сведён к расчёту однородных. В работах [104, 105] предложен новый подход к расчёту сложных и неоднородных тяговых сетей переменного тока. Новизна этого

моделирования состоит во введении в неоднородные участки тяговой сети источников тока и разбиении неоднородной тяговой сети на элементарные цепи с распределёнными параметрами. Такой подход позволяет полнее исследовать физику электрических процессов в тяговой сети.

В зависимости от поставленной прикладной задачи иногда достаточно для упрощения производить расчёты, используя однородную модель тяговой сети, построенную на основе эквивалентирования её элементов. На рисунке 1.6 представлен пример такой модели тяговой сети двухпутного участка, на которой параметры контактной сети и рельсов получены эквивалентированием их элементов, а реальный план пути представлен спрямлённой трассой.

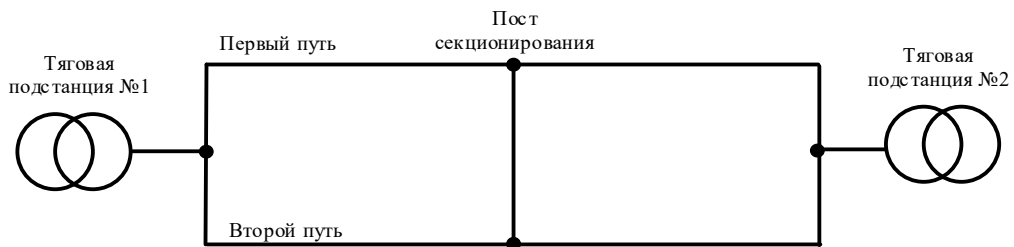


Рисунок 1.6 – Эквивалентированная схема участка с двусторонним питанием

При эквивалентировании схем двухпутных участков реальное взаимное сопротивление между контактными подвесками на отдельных участках пути заменяется осреднённым значением на всём протяжении. Такой подход вполне допустим, например, при определении транзита мощности, пропускной способности, потерь мощности и т.п.

На рисунке 1.7 приведён фрагмент схемы контактной сети реального участка СКЖД.

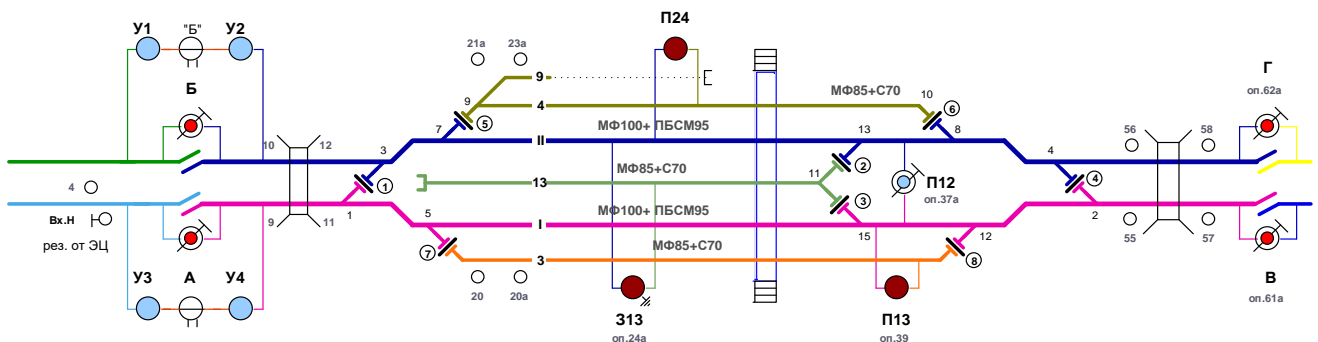


Рисунок 1.7 – Фрагмент схемы питания реального двухпутного участка

Контактная сеть станции разветвлена по сравнению с перегонем, Неоднородность этой схемы очевидна. По этой причине продольное сопротивление станций существенно отличается от аналогичного параметра на перегоне [104].

На реальных схемах контактной сети встречается, по официальной терминологии, уширение междупутья. Схема такого участка представлена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Эквивалентированная схема участка с переменной шириной междупутья

Кроме того, есть и другие причины, которые вызывают неоднородность тяговой сети: мосты и тоннели, одновременная замена изношенных проводов вдоль трассы пути.

Рельсовая сеть представляет наиболее сложную и неоднородную структуру. В соответствии с [68] её можно условно представить из двух, связанных между собой, частей с элементами:

- тяговой рельсовой сети (рельсы, путевые дроссель-трансформаторы, междурельсовые и междупутные перемычки, отсасывающие линии и др.);
- рельсовой линии (рельсы, шпалы, изолирующие элементы (прокладки, втулки), балластный слой и др.).

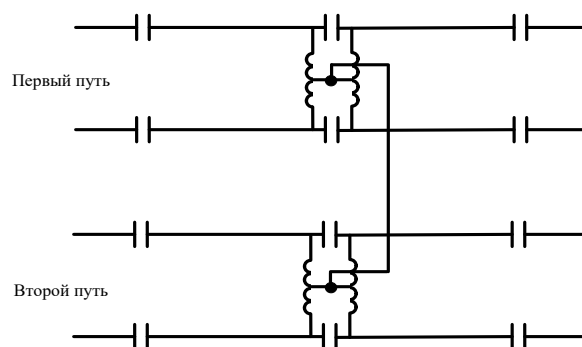


Рисунок 1.9 – Схема включения междупутной перемычки

Элементы первой группы формируют схемы тяговой рельсовой сети. Параллельное соединение путей обеспечивают междупутные перемычки, которые устанавливают между средними точками дроссель-трансформаторов таким образом, чтобы длина обходной цепи по смежным и параллельным путям была не менее 10 км (рисунок 1.9). Схемы и места расположения перемычек влияют на неоднородность сопротивления рельсовой цепи.

Рельсовая цепь через балластную призму связана с землей. Ток утечки из рельсов через переходное сопротивление  $r_{\text{п}}$  (рельсы-шпалы-балласт) попадает в землю и через сопротивление растеканию земли возвращается на подстанцию (рисунок 1.10).

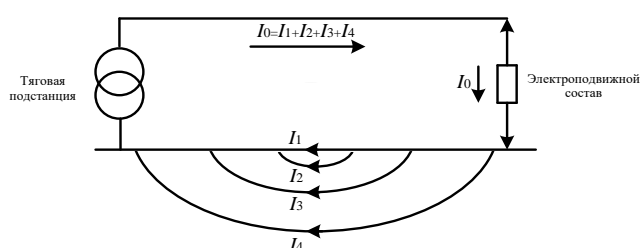


Рисунок 1.10 – Схема растекания токов в рельсах и земле

Переходное сопротивление  $r_{\text{п}}$  зависит от времени года и климатических условий района. Диапазон численных значений переходного сопротивления составляет 0,5-17,5 Ом·км [75].

Растекание тока в земле образует контуры, которые индуктивно связаны между собой. Утечка создаёт неравномерное распределение тока вдоль рельсовой цепи. В однородных моделях тяговой сети множество контуров заменяется схемой с двумя контурами — контактный провод-земля и рельсы-земля, которые индуктивно связаны между собой (рисунок 1.11).

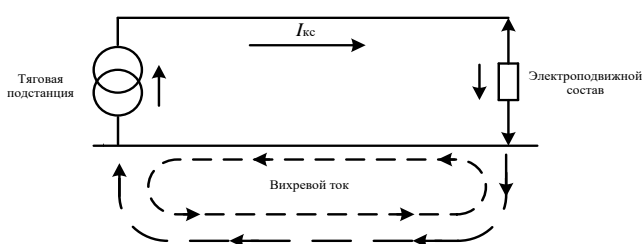


Рисунок 1.11 – Эквивалентные контуры токов в тяговой сети

При этом неравномерность распределения тока в рельсах, влияющая на удельное сопротивление тяговой сети, заменяется средним значением утечки токов. Такой подход был применён в методах определения места короткого замыкания, приведённых в разделе 1.1.

На величину сопротивления петли короткого замыкания наибольшее влияние оказывает электрическая дуга, неоднородность которой имеет случайный характер. По данным [56] наиболее частым видом КЗ контактной сети является перекрытие изоляторов, при котором сопротивление дуги может составлять 0,5-20 Ом и более в зависимости от вида КЗ и погоды. Согласно опытным данным [106] при падении провода на сухую каменистую почву переходное сопротивление в течение 6 периодов снижается от 42,5 Ом до 3,5 Ом, причём уже через 3 периода его величина не превышала 4,5 Ом.

Таким образом, для повышения точности определения параметров петли короткого замыкания в задаче определения места КЗ необходимо учитывать следующие неоднородности структуры тяговой сети:

- разнообразие схем питания тяговой сети;
- неравномерный износ контактных проводов вдоль пути;
- применение разных типов подвесок контактной сети вдоль пути;
- наличие тросов группового заземления, имеющих прерывистый характер включения вдоль пути;
- наличие поперечных соединений проводов контактной сети;
- наличие рельсовых междупутных перемычек;
- наличие участков тяговой сети с различной шириной сближения путей;
- сезонный характер сопротивления системы рельсы-земля;
- зависимость сопротивления рельсовой цепи от токов КЗ;
- влияние утечки токов на удельное сопротивление тяговой сети;
- варианты взаимного влияния элементов тяговой сети;
- неоднородность схемы внешнего электроснабжения;
- переходное сопротивление дуги в месте короткого замыкания.



### **1.3 Выводы по главе и задачи повышения достоверности определения места короткого замыкания**

Подводя итог анализа существующих методов и средств определения удалённости короткого замыкания, необходимо отметить следующее:

1. За прошедший полувековой период времени выполнено и продолжает выполняться большое количество теоретических и практических исследований, издано много научных публикаций по проблеме определения удалённости короткого замыкания в тяговой сети. Это свидетельствует о сложности, практической значимости и актуальности проблемы.

2. Значительными теоретическими достижениями в проблеме определения места короткого замыкания являются разработанные аналитические методы, в которых учитывается сопротивление дуги и переходное сопротивление рельсы-земля.

3. Разработаны оригинальные технические средства, ускоряющие поиск места повреждения.

4. Проблема определения места короткого замыкания до сих пор, однако, остаётся актуальной по следующим причинам:

– во-первых, аналитические выражения указания места КЗ и параметров дуги достаточно сложны и для их практического применения требуется измерение или косвенное вычисление значительного числа параметров;

– во-вторых, в аналитических выражениях не учитывается большинство неоднородностей тяговой сети, что приводит к погрешностям при расчёте параметров короткого замыкания;

– в-третьих, существующие технические средства поиска удалённости места повреждения способны указать лишь повреждённую секцию.

## 2 Глава – Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на параметры петли короткого замыкания

### 2.1 Постановка задачи

Определение удаленности места повреждения в тяговой сети до настоящего времени базируется, в основном, на получении информации о параметрах петли короткого замыкания.

В момент короткого замыкания измеряемыми параметрами являются: напряжение на шинах тяговой подстанции  $U$ , ток питающего фидера (присоединения)  $I$  и фазовый угол  $\varphi$ . Производными от измеренных параметров являются: полное  $Z$ , активное  $R$  и индуктивное  $X$  сопротивление петли короткого замыкания. Примем в дальнейшем для краткости считать, что в термин «параметры петли короткого замыкания» входят и производные параметры  $Z, R, X$ .

Численные значения параметров, образующих сопротивление петли короткого замыкания, содержат элемент случайности, поскольку они зависят от множества факторов: характера дуги, схемы питания, взаимного влияния смежных путей, удалённости места короткого замыкания, уровней напряжения на шинах смежных подстанций. Представляет интерес механизм взаимного влияния значений параметров тяговой сети на параметры петли короткого замыкания. Дуга является главным дестабилизирующим фактором при определении места повреждения в тяговой сети, поскольку её параметры меняются в широком диапазоне и имеют случайный характер.

В данной главе изложены результаты аналитических и углублённых компьютерных исследований влияния дуги на параметры петли короткого замыкания. Исследования проводились в широком диапазоне значений параметров дуги и расстояний до места КЗ.

Результаты этих исследований будут учтены при разработке способа определения места короткого замыкания. Сведения о компьютерной модели изложены в главе 3.

## 2.2 Влияние сопротивления дуги на параметры петли короткого замыкания

### 2.2.1 Одностороннее питание однопутного участка

Схема замещения однопутного участка с односторонним питанием приведена на рисунке 2.1.

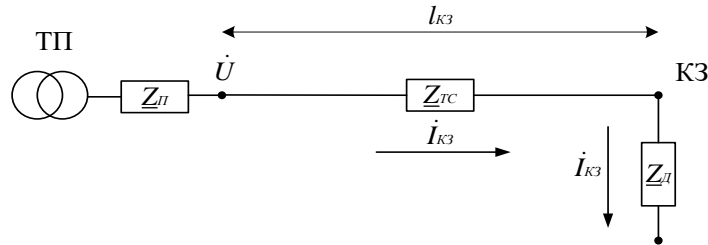


Рисунок 2.1 – Схема одностороннего питания однопутного участка

На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения:

ТП – тяговая подстанция; КЗ – место короткого замыкания;  $\dot{U}$  – напряжение на шинах тяговой подстанции;  $\dot{I}_{кз}$  – ток короткого замыкания (КЗ);  $\underline{Z}_{ТС}$  – сопротивление тяговой сети;  $\underline{Z}_{П}$  – сопротивление тяговой подстанции;  $\underline{Z}_{Д}$  – сопротивление дуги;  $l_{кз}$  – расстояние до места КЗ.

Из схемы рисунка 2.1 следует, что напряжению на шинах тяговой подстанции  $\dot{U}$  соответствует падение напряжения на сопротивлениях тяговой сети и дуги:

$$\dot{U} = \dot{I}_{кз} \underline{Z}_{П} + \dot{I}_{кз} \underline{Z}_{ТС} + \dot{I}_{кз} \underline{Z}_{Д} \quad (2.1)$$

Обозначим через  $r_{Д}$  активное сопротивление дуги  $\underline{Z}_{Д}$ . Тогда сопротивление петли короткого замыкания  $\underline{Z}_{кз}$  можно представить в виде:

$$\underline{Z}_{кз} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_{кз}} = \underline{Z}_{П} + \underline{Z}_{ТС} + \underline{Z}_{Д} = R_{П} + jX_{П} + R_{ТС} + jX_{ТС} + Z_{Д}. \quad (2.2)$$

Известно [34,35], что дуга не влияет на индуктивную составляющую и это также подтверждает формула (2.2). Влияние дуги на другие параметры петли короткого замыкания -  $Z$ ,  $R$ ,  $\varphi$  исследовалось на компьютерной модели при сопротивлениях  $Z_{Д}$  (0-10 Ом) и расстояниях до места КЗ  $L_{3}$  (0-24 км). Полученные графические зависимости  $(Z, R, \varphi) = f(L_{3}, Z_{Д})$ , представлены на рисунках 2.2 - 2.4.

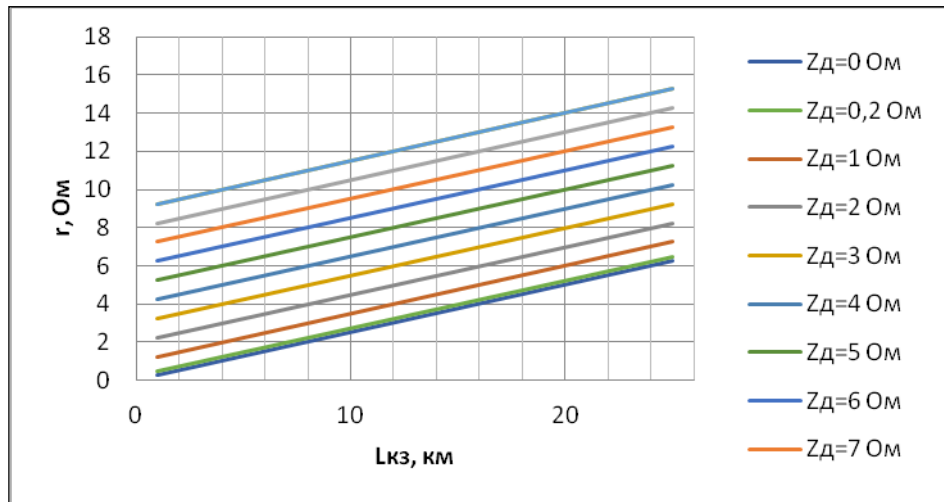


Рисунок 2.2 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на активную составляющую сопротивления петли КЗ

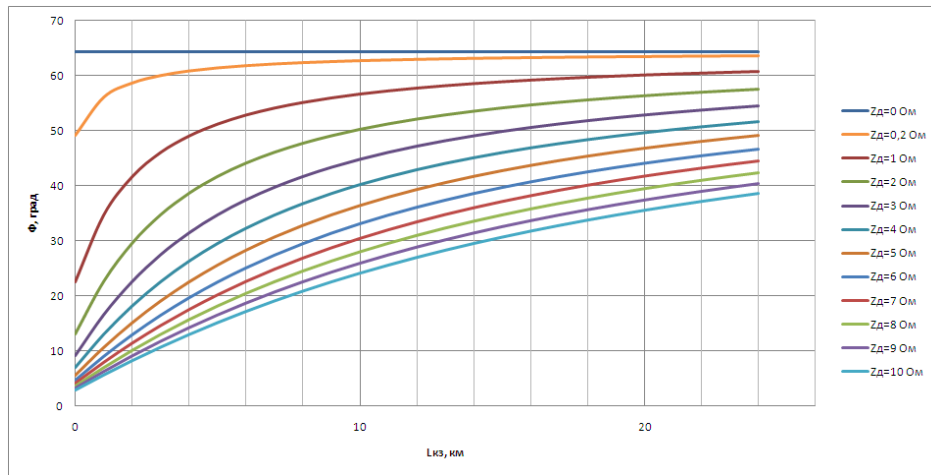


Рисунок 2.3 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на фазовый угол

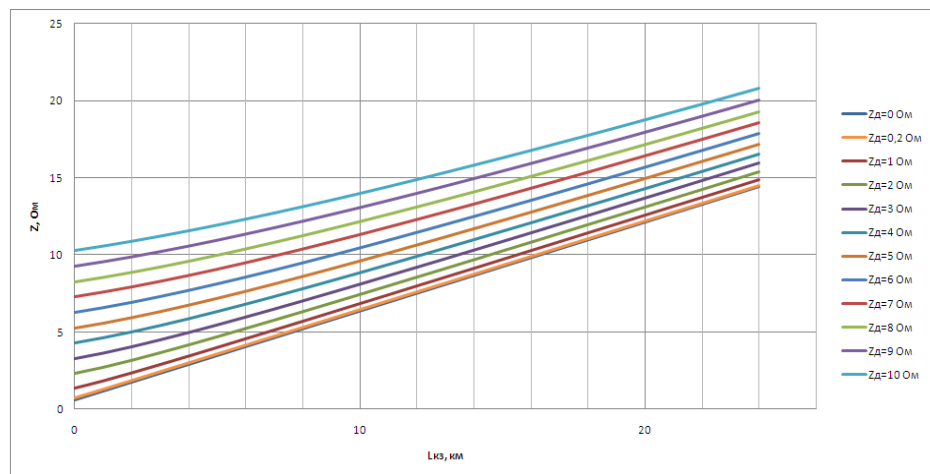


Рисунок 2.4 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на полное сопротивление петли КЗ

Представленные графики показывают, что дуга создаёт разброс и нелинейности параметров  $Z$ ,  $R$ ,  $\varphi$ . На рисунке 2.4 видно, что при отсутствии дуги (нижняя линия графика) график  $Z_{KЗ}=q(L_{KЗ})$  линейный, а с увеличением сопротивления дуги растёт его нелинейность. Разброс значений параметров петли короткого замыкания на протяжении участка 0 – 24 км при сопротивлениях дуги 0 – 10 Ом составляет:

- полного сопротивления 1,5 – 21 Ом;
- активного сопротивления 1,5 – 21 Ом;
- фазового угла 4–65 градусов.

Следует отметить, что фазовый угол является одним из трёх параметров, измеряемых в момент короткого замыкания. По этой причине использование параметра  $\varphi$  при разработке нового метода определения места короткого замыкания является актуальным.

### 2.2.2 Двустороннее питание однопутного участка

Схема замещения однопутного участка с двусторонним питанием показана на рисунке 2.5.

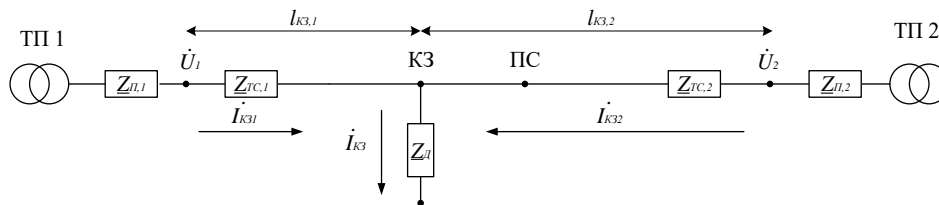


Рисунок 2.5 – Схема двустороннего питания однопутного участка

На рисунке 2.5 приняты следующие обозначения:

ТП 1, ТП 2 – соответственно тяговые подстанции 1 и 2;

ПС – пост секционирования;

$\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – соответственно напряжение на шинах тяговой подстанции 1 и 2;

$\dot{I}_{кз1}$  – ток короткого замыкания от тяговой подстанции 1;

$\dot{I}_{кз2}$  – ток короткого замыкания от тяговой подстанции 2;

$\dot{I}_{кз}$  – ток короткого замыкания в месте КЗ;

$\underline{Z}_{TC,1}$  – сопротивление тяговой сети от тяговой подстанции 1 до места КЗ;

$\underline{Z}_{TC,2}$  – сопротивление тяговой сети от тяговой подстанции 2 до места КЗ;

$\underline{Z}_{П,1}$  – сопротивление тяговой подстанции 1;

$\underline{Z}_{П,2}$  – сопротивление тяговой подстанции 2;

$l_{КЗ,1}$  – расстояние от тяговой подстанции 1 до места КЗ;

$l_{КЗ,2}$  – расстояние от тяговой подстанции 2 до места КЗ.

Известно из практики расчётов токов короткого замыкания, что при двустороннем питании тяговой сети активное сопротивление дуги может изменять индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ. Однако механизм этого влияния недостаточно освещён. В данном разделе рассматривается, при каких условиях возникает это влияние.

Рассмотрим два случая.

а) Первый случай.

Примем, что напряжения на шинах тяговых подстанций и сопротивления подстанций одинаковые, т.е.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2; \quad Z_{П,1} = Z_{П,2}; \quad \underline{Z}_Д \neq 0 \quad (2.3)$$

При этом условии в момент КЗ значения токов короткого замыкания тяговых подстанций будут обратно пропорциональны расстояниям до места короткого замыкания во всех точках межподстанционной зоны:

$$(\dot{I}_{КЗ2} / \dot{I}_{КЗ1}) = (Z_{П1} + Z_{TC1} + Z_{КЗ}) / (Z_{П2} + Z_{TC2} + Z_{КЗ}) = k. \quad (2.4)$$

В момент КЗ баланс напряжений со стороны шин подстанции ТП1 будет:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{КЗ1} \underline{Z}_{П,1} + \dot{I}_{КЗ1} \underline{Z}_{TC,1} + \dot{I}_{КЗ} \underline{Z}_Д = \dot{I}_{КЗ1} \underline{Z}_{П,1} + \dot{I}_{КЗ1} \underline{Z}_{TC,1} + (\dot{I}_{КЗ1} + \dot{I}_{КЗ2}) \underline{Z}_Д. \quad (2.5)$$

При этом сопротивление петли КЗ  $\underline{Z}_{КЗ,1}$  со стороны ТП1 будет:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{КЗ1}} = \underline{Z}_{КЗ,1} = \underline{Z}_{П,1} + \underline{Z}_{TC,1} + \underline{Z}_Д \left(1 + \frac{\dot{I}_{КЗ2}}{\dot{I}_{КЗ1}}\right). \quad (2.6)$$

Представим  $\underline{Z}_{TC,1}$ ,  $\underline{Z}_{П,1}$ ,  $\dot{I}_{КЗ1}$  и  $\dot{I}_{КЗ2}$  в виде комплексов:

$$\underline{Z}_{TC,1} = R_{TC,1} + jX_{TC,1}; \quad \underline{Z}_{П,1} = R_{П,1} + jX_{П,1}; \quad \dot{I}_{КЗ1} = I_{r,1} - jI_{x,1}; \quad \dot{I}_{КЗ2} = I_{r,2} - jI_{x,2}. \quad (2.7)$$

Подставив (2.7) в (2.6), получим:

$$\underline{Z}_{K3,1} = R_{TC,1} + jX_{TC,1} + R_{П,1} + jX_{П,1} + Z_{Д} \left( 1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1} + jI_{r,1}I_{x,2} - jI_{x,1}I_{r,2}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right) \quad (2.8)$$

Рассмотрим в (2.8) слагаемые

$$+jI_{r,1}I_{x,2} - jI_{x,1}I_{r,2}. \quad (2.9)$$

С учётом (2.4) получим  $I_{r,2} = \kappa I_{r,1}$ ;  $I_{x,2} = \kappa I_{x,1}$  и тогда вместо (2.9) будет

$$+j\kappa I_{r,1}I_{x,1} - j\kappa I_{x,1}I_{r,1} = 0 \quad (2.10)$$

Учитывая (2.10), вместо (2.8) получим

$$\underline{Z}_{K3,1} = R_{TC,1} + jX_{TC,1} + R_{П,1} + jX_{П,1} + Z_{Д} \left( 1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right). \quad (2.11)$$

Таким образом, выражение (2.11) можно представить в виде:

$$\underline{Z}_{K3,1} = (R_{TC,1} + R_{П,1} + A) + jX_{TC,1} + jX_{П,1}. \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) видно, что при условии (2.3) дуга не влияет на формирование дополнительной индуктивной составляющей сопротивления петли КЗ, так как на дуге имеется баланс реактивных падений напряжений, и увеличивает активное сопротивление петли короткого замыкания на величину

$$A = Z_{Д} \left( 1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right). \quad (2.12)$$

б) Второй случай. Примем условие

$$U_1 > U_2; \quad Z_{П,1} = Z_{П,2}; \quad \underline{Z}_{Д} \neq 0. \quad (2.14)$$

При этом условии между подстанциями будет протекать уравнительный ток  $I_y$ , который изменит токи питающих присоединений (фидеров):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{K31} + I_y; \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{K32} - I_y;$$

Пропорция (2.4) не соблюдается  $(\dot{I}_{K32} - I_y) / (\dot{I}_{K31} + I_y) \neq (l_{K3,1} / l_{K3,2})$  и в выражении (2.8) результат сложения мнимых составляющих будет не равен нулю:

$$+jI_{r,1}I_{x,2} - jI_{x,1}I_{r,2} \neq 0. \quad (2.15)$$

Тогда с учётом (2.15) выражение (2.8) примет вид:

$$\underline{Z}_{K3,1} = R_{TC,1} + jX_{TC,1} + R_{П,1} + jX_{П,1} + Z_{Д} \left( 1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right) + j \cdot Z_{Д} \left( \frac{I_{r,1} \cdot I_{x,2} - I_{r,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right). \quad (2.16)$$

$$\text{Обозначим: } A = Z_{Д} \left( 1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right); \quad B = jZ_{Д} \left( \frac{I_{r,1} \cdot I_{x,2} - I_{r,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \right). \quad (2.17)$$

Таким образом, формулу (2.16) можно представить в виде:

$$\underline{Z}_{K3,1} = (R_{TC,1} + R_{II,1} + A) + j(X_{TC,1} + X_{II,1} + B). \quad (2.18)$$

Расчёты показывают, что при КЗ до поста секционирования  $jI_{r1}I_{x2} - jI_{x1}I_{r2} > 0$ , поэтому в выражении (2.18) принимается  $B > 0$ .

В рассмотренном случае, как следует из (2.16) и (2.18), дуга влияет на появление дополнительных индуктивной и активной составляющих в сопротивлении петли короткого замыкания.

При значениях  $Z_D$  (0 – 10 Ом) и расстояниях  $L_3$  (0 – 24км) до места КЗ, были получены на компьютерной модели графические зависимости  $(Z, R, X, \varphi) = f(L_3, Z_D)$ , представленные на рисунках 2.6 – 2.9.

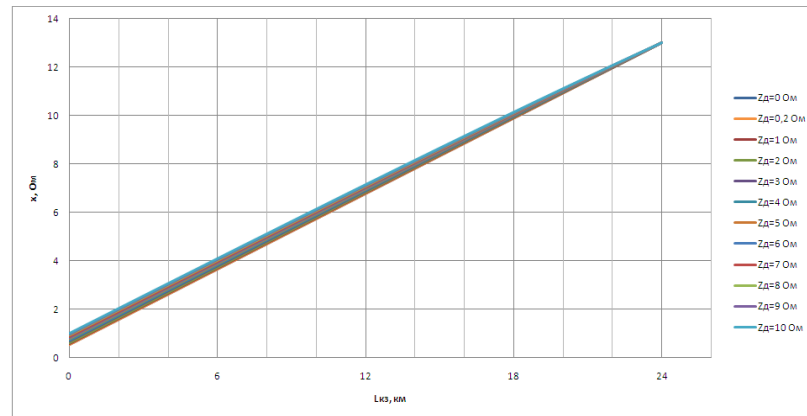


Рисунок 2.6 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на индуктивное сопротивление петли короткого замыкания при двустороннем питании и  $U_1 \neq U_2$

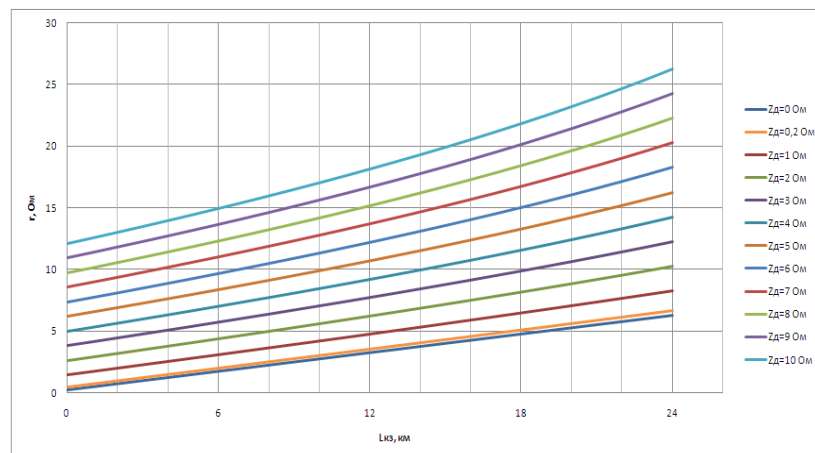


Рисунок 2.7 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на активное сопротивление петли КЗ при двустороннем питании



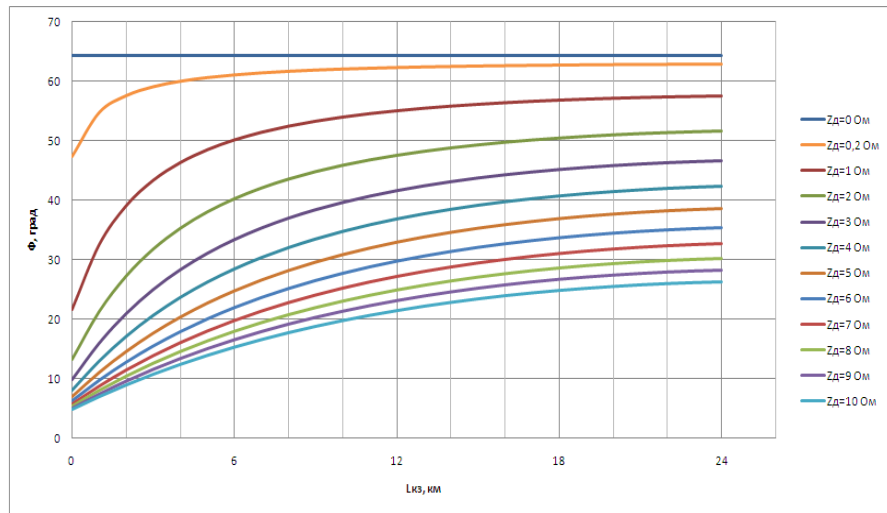


Рисунок 2.8 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на фазовый угол петли короткого замыкания при двустороннем питании

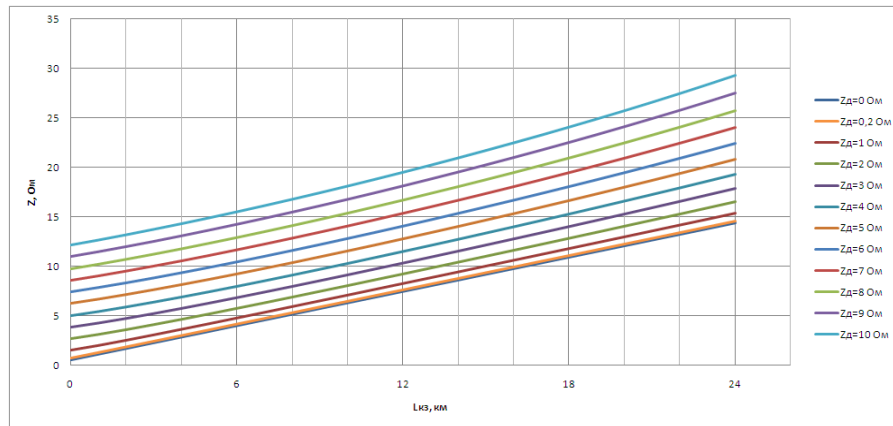


Рисунок 2.9 – Влияние сопротивления дуги и места КЗ на полную составляющую сопротивления петли КЗ при двустороннем питании

На рисунках 2.6 – 2.9 видно, что при  $Z_d = 0$  графики всех параметров петли КЗ линейны. По мере роста сопротивлений дуги, фазовый угол уменьшается, активная составляющая растёт и графики фазового угла, активного и полного сопротивлений приобретают нелинейный характер.

Индуктивное сопротивление петли КЗ состоит из двух составляющих: индуктивного сопротивления подстанции и дополнительной индуктивной составляющей, сформированной дугой (блок В в формулах 2.17 и 2.18), которые изменяют ширину графика индуктивной составляющей (рисунок 2.9). Интересно, что при этом график индуктивной составляющей остаётся линейным.

Дуга существенно влияет на разброс параметров петли КЗ, который в границах  $Z_{д}$  (0 – 10 Ом) и  $L_3$  (0–24 км) составляет:

- по активному сопротивлению 12,5-20 Ом;
- по полному сопротивлению 12,5-15 Ом;
- по индуктивному сопротивлению 0,5-0 Ом;
- по фазовому углу 60 - 31 град.

### 2.3 Влияние сопротивления дуги и взаимной индукции смежного пути на параметры петли короткого замыкания

В первой главе отмечалось, что одной из неоднородностей тяговых сетей является уширение междупутья на некоторых участка пути, что сказывается на изменении сопротивления взаимной индукции вдоль пути. На примерах двухпутных участков будет дана оценка этой неоднородности и влияние дуги на параметры петли короткого замыкания.

#### 2.3.1 Одностороннее питание двухпутного участка

Рассмотрим схему консольно-кольцевого питания с коротким замыканием в конце консоли, представленную на рисунке 2.10

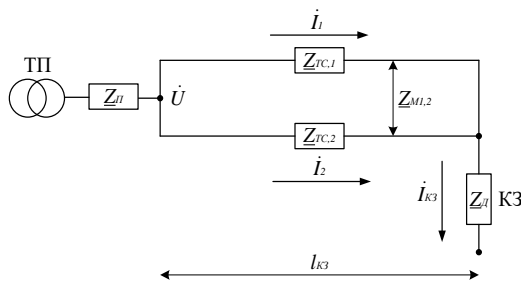


Рисунок 2.10 – Схема консольно-кольцевого питания двухпутного участка

На рисунке 2.10 приняты следующие обозначения:

$I_1$  – ток короткого замыкания первого пути от ТП до места КЗ;

$I_2$  – ток короткого замыкания второго пути от ТП до места КЗ;

$Z_{ТС,1}$  – сопротивление тяговой сети первого пути;

$Z_{ТС,2}$  – сопротивление тяговой сети второго пути;

$\underline{Z}_{M2,1}$  – сопротивление взаимного влияния между 1-ым и 2-ым путём.

Напряжение на шинах ТП:

$$\dot{U} = \dot{I}_1 \underline{Z}_\Pi + \dot{I}_1 \underline{Z}_{TC,1} + \dot{I}_2 \underline{Z}_{M2,1} + \dot{I}_{K3} \underline{Z}_D, \quad (2.19)$$

где  $\dot{I}_{K3} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ .

Сопротивление петли КЗ по первому пути  $\underline{Z}_{K3,1}$ :

$$\underline{Z}_{K3,1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} + \underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_{TC,1} = \underline{Z}_{TC,1} + \underline{Z}_\Pi + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \underline{Z}_{M2,1} + \underline{Z}_D \left(1 + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\right). \quad (2.20)$$

Величины сопротивлений  $\underline{Z}_{TC,1}$ ,  $\underline{Z}_\Pi$ ,  $\underline{Z}_{M2,1}$  и токов  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  представим в виде:

$$\underline{Z}_{TC,1} = R_{TC,1} + jX_{TC,1}; \quad \underline{Z}_\Pi = R_\Pi + jX_\Pi; \quad \underline{Z}_{M2,1} = R_{M2,1} + jX_{M2,1}; \quad \dot{I}_1 = I_{r,1} - jI_{x,1}; \quad \dot{I}_2 = I_{r,2} - jI_{x,2} \quad (2.21)$$

Подставив (2.21) в (2.20), получим:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{K3,1} = & R_{TC,1} + jX_{TC,1} + R_\Pi + jX_\Pi + \frac{R_{M2,1}(I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}) + X_{M2,1}(I_{x,2} \cdot I_{r,1} - I_{r,2} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} + \\ & + j \frac{R_{M2,1}(I_{r,2} \cdot I_{x,1} - I_{x,2} \cdot I_{r,1}) + X_{M2,1}(I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} + \\ & + \underline{Z}_D \left(1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right) + j \cdot \underline{Z}_D \left(\frac{I_{x,2} \cdot I_{r,1} - I_{r,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right). \end{aligned} \quad (2.22)$$

Введём обозначения:

$$\begin{aligned} A = & \underline{Z}_D \left(1 + \frac{I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right); \quad B = j \underline{Z}_D \left(\frac{I_{x,2} \cdot I_{r,1} - I_{r,2} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right); \\ C = & \frac{R_{M2,1}(I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1}) + X_{M2,1}(I_{x,2} \cdot I_{r,1} - I_{r,2} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}; \\ D = & j \frac{X_{M2,1}(I_{r,2} \cdot I_{r,1} + I_{x,2} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Числитель блока  $B$  равен  $+jI_{r1}I_{x2} - jI_{x1}I_{r2} = 0$ . Это значит, что дуга не вносит дополнительной составляющей в индуктивное сопротивление петли КЗ. Тогда формулу (2.22) можно представить в виде:

$$\underline{Z}_{K3,1} = (R_{TC,1} + R_\Pi + A + C) + j(X_{TC,1} + X_\Pi + D). \quad (2.24)$$

Анализ выражений (2.23, 2.24) показывает:

- дуга не приводит к появлению дополнительной индуктивной составляющей в сопротивлении петли КЗ, т.к. блок  $B=0$ , но увеличивает активную составляющую (блок  $A$ );

- взаимная индуктивность увеличивает активную составляющую (блок  $C$ ) и индуктивную составляющую (блок  $D$ ) петли КЗ.

Влияние дуги и сопротивления взаимной индукции на параметры петли короткого замыкания исследовалось на компьютерной модели при сопротивлениях  $Z_D$  (0-5 Ом) и расстояниях до места КЗ  $L_{кз}$  (0-24 км). Полученные графические зависимости  $(X, Z, R, \varphi.)=f(L_{кз}, Z_D)$ , представлены на рисунках 2.11 – 2.14.

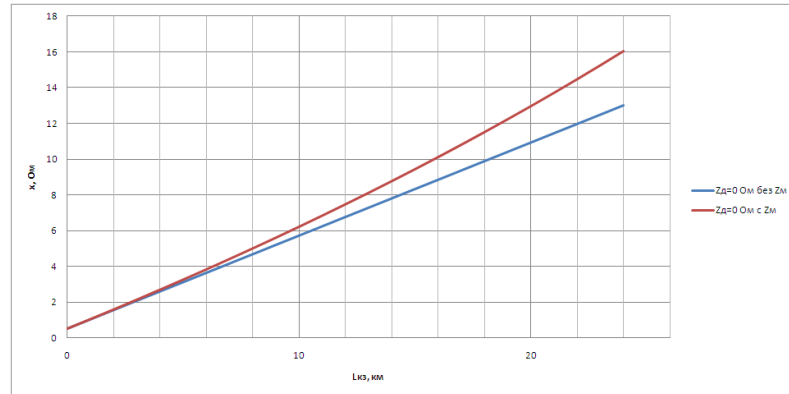


Рисунок 2.11 – Влияние взаимной индуктивности смежного пути на индуктивное сопротивление петли КЗ

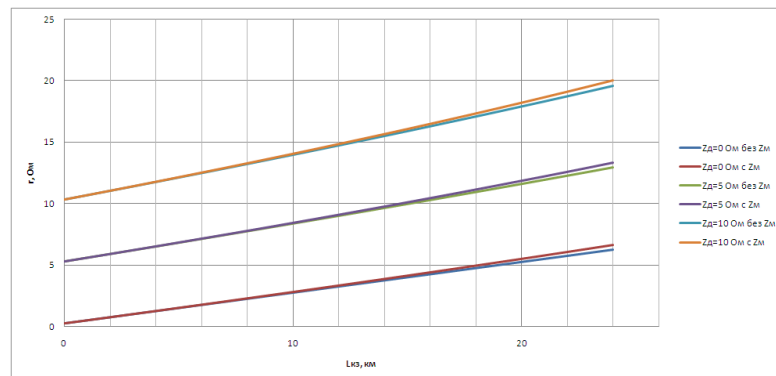


Рисунок 2.12 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на активное сопротивление петли КЗ

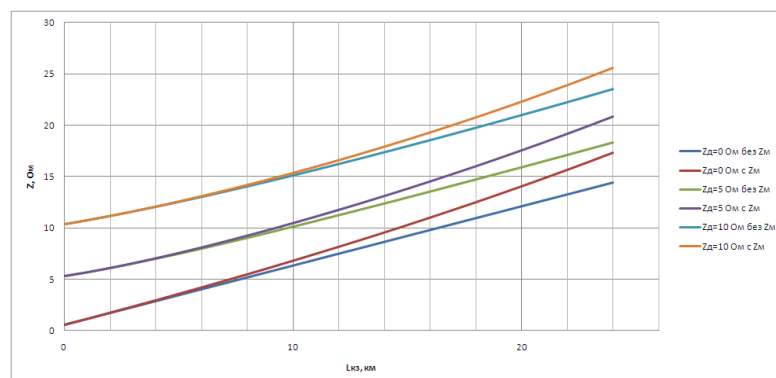


Рисунок 2.13 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на полное сопротивление петли КЗ

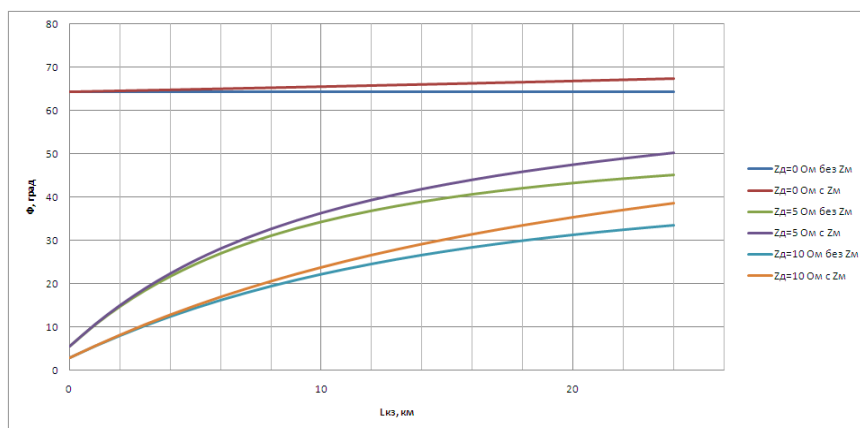


Рисунок 2.14 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на фазовый угол

Анализ графиков на 24 км показывает:

- взаимная индуктивность увеличивает параметр  $X$  на 3 Ом (рисунок 2.11);
- дуга сопротивлением 5 Ом увеличивает параметр  $R$  на 7,5 Ом (рисунок 2.12);
- взаимная индуктивность увеличивает параметр  $R$  на 5 Ом и создаёт нелинейность (рисунок 2.12);
- дуга 5 Ом на участке с 0 км – 24 км изменяет фазовый угол с 5 градусов – 45 градусов;
- взаимная индуктивность изменяет фазовый угол на 5 градусов.

### 2.3.2 Двустороннее питание двухпутного участка

Рассмотрим схему замещения двухпутного участка с двусторонним питанием при коротком замыкании, представленную на рисунке 2.15.

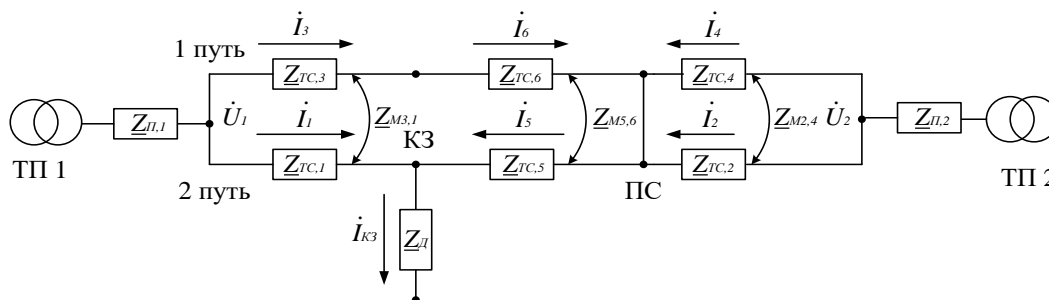


Рисунок 2.15 – Схема замещения двухпутного участка при коротком замыкании

На рисунке 2.15 приняты следующие обозначения:

$\underline{Z}_{TC,1}, \dot{I}_1$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 2-го пути от ТП 1;

$\underline{Z}_{TC,2}, \dot{I}_2$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 2-го пути от ТП 2 до ПС;

$\underline{Z}_{TC,3}, \dot{I}_3$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 1-го пути от ТП 1 до места КЗ;

$\underline{Z}_{TC,4}, \dot{I}_4$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 1-го пути от ТП 2 до ПС;

$\underline{Z}_{TC,5}, \dot{I}_5$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 2-го пути от ПС до места КЗ;

$\underline{Z}_{TC,6}, \dot{I}_6$  – сопротивление тяговой сети и ток КЗ 1-го пути от ПС до места КЗ;

$\underline{Z}_{M3,1}$  – сопротивление взаимного влияния 1-го и 2-го пути от ТП1 до места КЗ.

Распределение падений напряжения в контуре КЗ будет:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \underline{Z}_{\Pi} + \dot{I}_1 \underline{Z}_{TC,1} \pm \dot{I}_3 \underline{Z}_{M3,1} + \dot{I}_{K3} \underline{Z}_D, \quad (2.25)$$

где  $\dot{I}_{K3} = \dot{I}_1 + \dot{I}_5$ .

В формуле (2.25) знак «±» зависит от направления токов 1-го и 2-го пути.

Сопротивление петли КЗ  $\underline{Z}_{K3,1}$  со стороны ТП 1:

$$\underline{Z}_{K3,1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} + \underline{Z}_{TC,1} + \underline{Z}_{\Pi,1} = \underline{Z}_{TC,1} + \underline{Z}_{\Pi,1} \pm \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_1} \underline{Z}_{M3,1} + \underline{Z}_D \left(1 + \frac{\dot{I}_5}{\dot{I}_1}\right). \quad (2.26)$$

Величины сопротивлений  $\underline{Z}_{TC,1}$ ,  $\underline{Z}_{\Pi,1}$ ,  $\underline{Z}_{M3,1}$  и токов  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_3$ ,  $\dot{I}_5$  представим в виде:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{TC,1} &= R_{TC,1} + jX_{TC,1}; & \underline{Z}_{\Pi,1} &= R_{\Pi,1} + jX_{\Pi,1}; & \underline{Z}_{M3,1} &= R_{M3,1} + jX_{M3,1}; \\ \dot{I}_1 &= I_{r,1} - jI_{x,1}; & \dot{I}_3 &= I_{r,3} - jI_{x,3}; & \dot{I}_5 &= I_{r,5} - jI_{x,5}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Подставив (2.27) в (2.26), получим:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{K3,1} &= R_{TC,1} + jX_{TC,1} + R_{\Pi,1} + jX_{\Pi,1} \pm \frac{R_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{r,1} + I_{x,3} \cdot I_{x,1}) + X_{M3,1}(I_{x,3} \cdot I_{r,1} - I_{r,3} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} \pm \\ &\pm j \frac{R_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{x,1} - I_{x,3} \cdot I_{r,1}) + X_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{r,1} + I_{x,3} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2} + \\ &+ \underline{Z}_D \left(1 + \frac{I_{r,5} \cdot I_{r,1} + I_{x,5} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right) + j \cdot \underline{Z}_D \left(\frac{I_{x,5} \cdot I_{r,1} - I_{r,5} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Упростим формулу (2.28), введём обозначение:

$$\begin{aligned} A &= \underline{Z}_D \left(1 + \frac{I_{r,5} \cdot I_{r,1} + I_{x,5} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right); & jB &= j\underline{Z}_D \left(\frac{I_{x,5} \cdot I_{r,1} - I_{r,5} \cdot I_{x,1}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}\right); \\ C &= \frac{R_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{r,1} + I_{x,3} \cdot I_{x,1}) + X_{M3,1}(I_{x,3} \cdot I_{r,1} - I_{r,3} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}; \\ jD &= j \frac{R_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{x,1} - I_{x,3} \cdot I_{r,1}) + X_{M3,1}(I_{r,3} \cdot I_{r,1} + I_{x,3} \cdot I_{x,1})}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Тогда (2.28) можно представить в виде:

$$\underline{Z}_{кз,1} = (R_{TC,1} + R_{II,1} + A \pm C) + j(X_{TC,1} + X_{II,1} + B + D). \quad (2.30)$$

Представленные формулы поясняют механизм влияния сопротивления дуги на реактивное сопротивление петли КЗ.

В выражении (2.30) блок  $B$  учитывает дополнительное незначительное влияние дуги на индуктивную составляющую петли КЗ. Условия этих влияний аналогичны тем, которые были рассмотрены в разделе 2.2.2.

Блок  $D$  учитывает появление дополнительной составляющей индуктивного сопротивления петли КЗ за счёт взаимного индуктивного влияния соседнего пути. Наглядное представление о влиянии взаимной индукции на появление дополнительной составляющей индуктивного сопротивления петли КЗ (блока  $D$ ) даёт формула 2.30.

На рисунках 2.16-2.19 представлены графики параметров петли короткого замыкания, рассчитанные на компьютерной модели при сопротивлениях дуги  $Z_d$  (0; 5 Ом), расстояниях до места КЗ  $L_{кз}$  (0-24 км), одинаковых напряжениях на шинах питающих подстанций с учетом и без учета влияния сопротивления взаимоиндукции смежного пути.

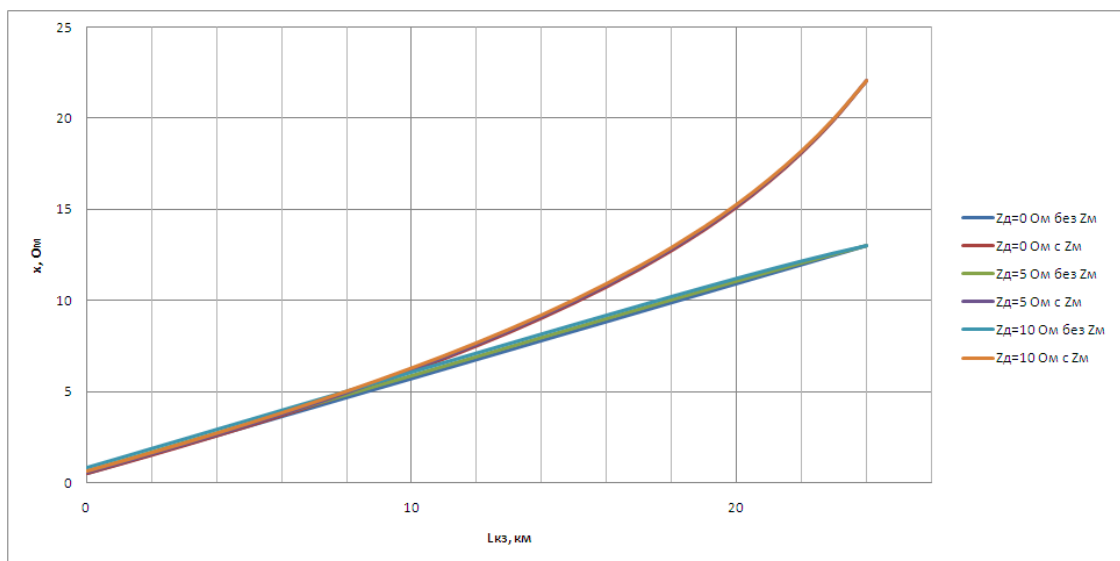


Рисунок 2.16 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на индуктивное сопротивление петли КЗ

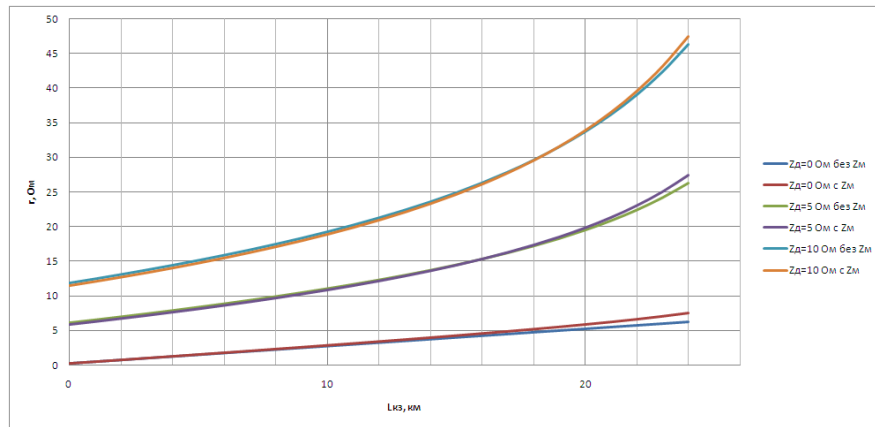


Рисунок 2.17 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на активное сопротивление петли

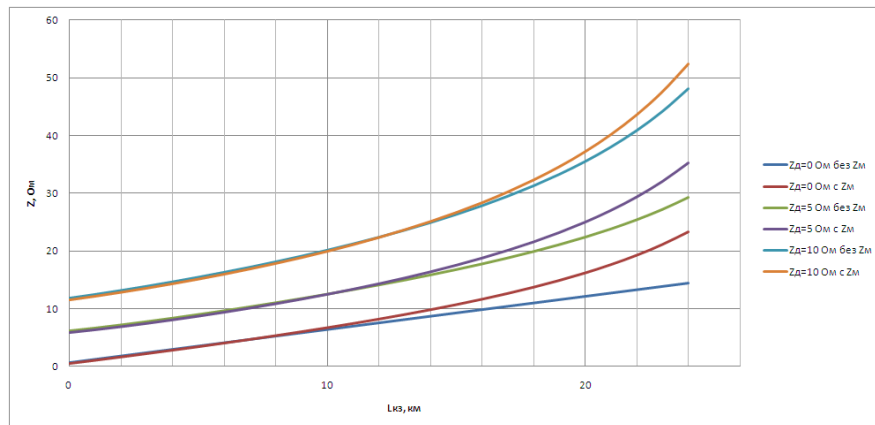


Рисунок 2.18 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на полное сопротивление петли КЗ

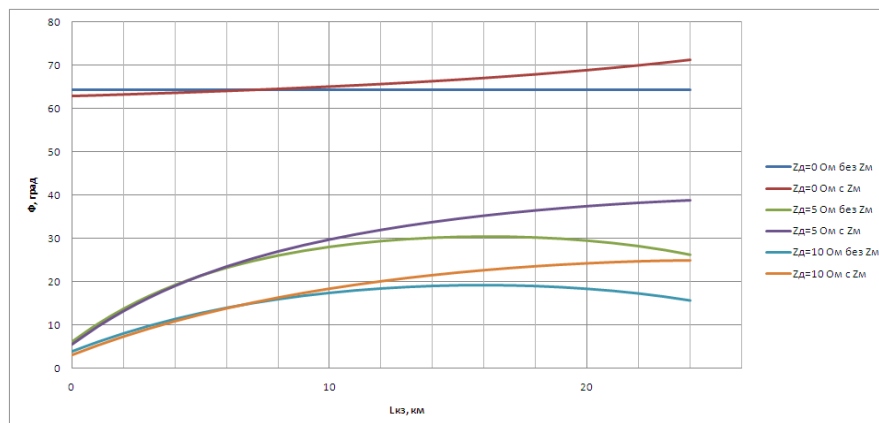


Рисунок 2.19 – Влияние сопротивления дуги и взаимной индуктивности смежного пути на фазовый угол при КЗ на двухпутном участке двустороннего питания



Представленные на рисунках 2.16-2.19 графики показывают, что:

- взаимная индуктивность смежного пути создаёт нелинейность индуктивной составляющей сопротивления петли КЗ;
- взаимная индуктивность смежного пути существенно увеличивает индуктивное сопротивление петли КЗ на 24 км на 12,5 Ом;
- дуга существенно увеличивает нелинейность активного сопротивления параметра петли КЗ;
- взаимная индуктивность смежного пути увеличивает фазовый угол на всём протяжении  $L_{КЗ}$  (0-24 км). На 24 км при  $Z_{д} = 0$  фазовый угол увеличился на 5 градусов.

Таким образом, сопротивление взаимной индукции и дуга существенно влияют на все параметры сопротивления петли КЗ. При этом наименьшему воздействию подвержена индуктивная составляющая сопротивления петли КЗ.

## 2.4 Исследование влияния схемы питания на параметры петли короткого замыкания

Анализ существующих методов определения места короткого замыкания, представленный в главе 1, показал, что каждой схеме питания соответствует свой метод определения места повреждения тяговой сети. Поэтому схема питания может условно рассматриваться как фактор неоднородности тяговой сети.

На примерах схем отдельного и узлового питания ниже показано, насколько схема питания может влиять на параметры петли короткого замыкания. Результаты исследований представлены на графиках рисунков 2.20-2.23.

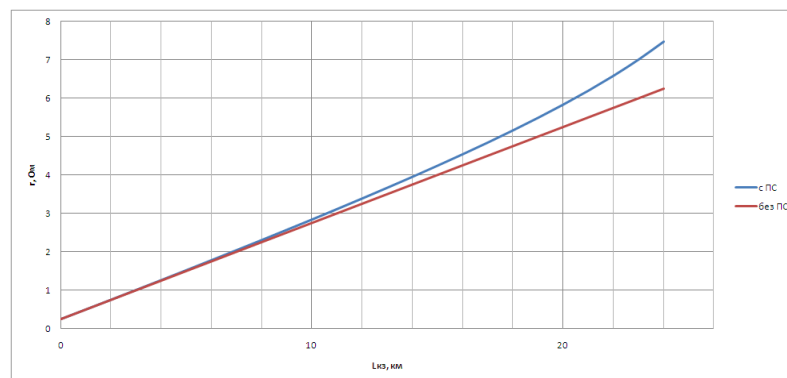


Рисунок 2.20 – Влияние схемы питания на активную составляющую сопротивления петли КЗ

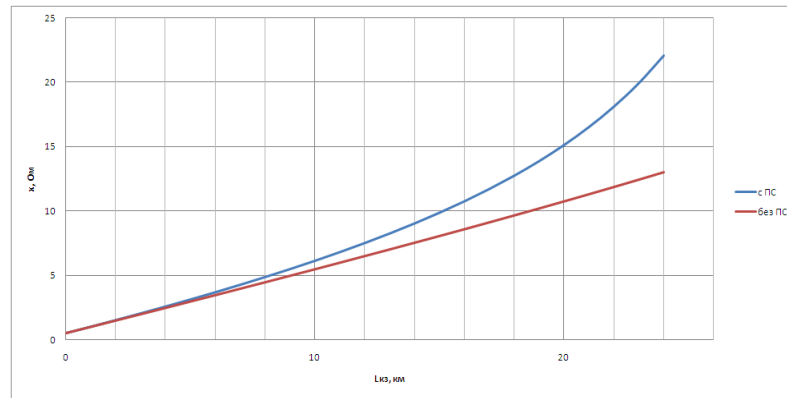


Рисунок 2.21 – Влияние схемы питания на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ

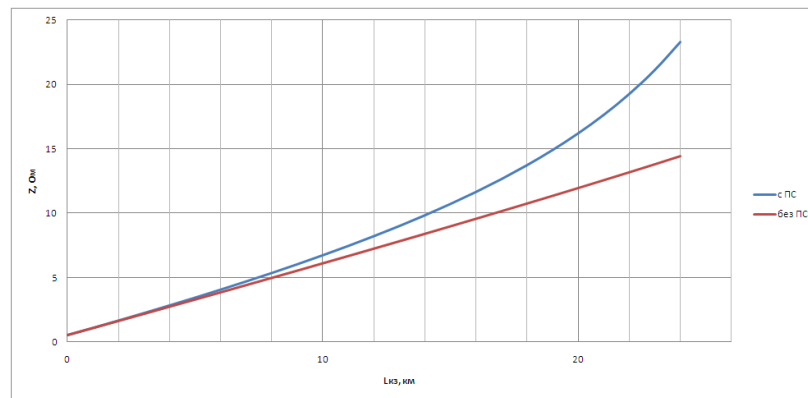


Рисунок 2.22 – Влияние схемы питания на полную составляющую сопротивления петли КЗ

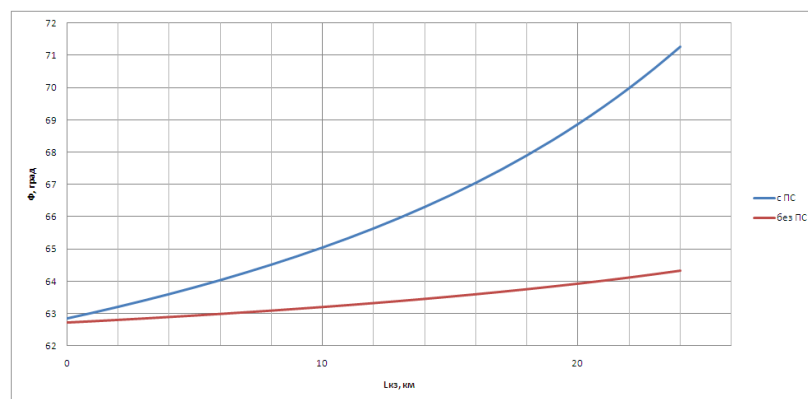


Рисунок 2.23 – Влияние схемы питания на фазовый угол

Исследование проводилось без дуги.

Анализ графиков, представленных на рисунках 2.20-2.23, показывает, что при коротком замыкании, например на 18 километре, параметры петли короткого

замыкания при схемах узлового и раздельного питания имеют следующие расхождения:

- по индуктивной составляющей – 9,64-12,72 Ом;
- по активной составляющей – 4,75-5,16 Ом;
- по полной составляющей – 10,75-13,73 Ом;
- по фазовому углу – 63,75-67,9 град.

Следовательно, неоднородности тяговой сети, связанные со схемой питания должны учитываться при разработке метода определения места КЗ. Это было учтено в главе 3 при разработке нового метода.

## **2.5 Выводы по главе**

1. Взаимное влияние элементов тяговой сети формирует нелинейный характер параметров петли короткого замыкания.

2. Дуга прямо или косвенно существенно влияет на все параметры петли короткого замыкания. Случайный характер переходного сопротивления дуги приводит к случайному значению численных значений параметров петли короткого замыкания.

3. При разработке нового метода определения удалённости места КЗ ни один из параметров петли короткого замыкания не может быть использован в качестве единственного критерия.

4. Необходим новый подход к разработке такого метода, который объединит все четыре параметра петли короткого замыкания и будет учитывать влияние случайного характера дуги на численные значения параметров петли короткого замыкания.

5. Новый метод должен быть основан на современных компьютерных технологиях моделирования, которые позволят учесть неоднородности тяговой сети и этим максимально приблизить модель к реальным условиям.

### 3 Глава – Компьютерное моделирование тяговой сети переменного тока

#### 3.1 Постановка задачи

Существующие методы определения места короткого замыкания, как было показано в первой главе, базируются на аналитических моделях и измеренных параметрах петли короткого замыкания. При выводе формул широко применяется процедура эквивалентирования элементов тяговой сети с целью упрощения [37, 54, 55, 70, 75, 76]. Очевидно, что за основу методов, связанных с определением места короткого замыкания, целесообразнее взять компьютерное моделирование, которое позволяет воспроизводить более подробную, более детализированную структуру тяговой сети. Современные компьютерные технологии позволяют успешно решать подобные задачи. При этом расчёты схем любой сложности рассчитываются посредством одинакового алгоритма.

Детализированная компьютерная модель должна отвечать следующим требованиям:

- максимально учитывать неоднородности тяговой сети;
- иметь минимальную степень эквивалентирования элементов контактной сети, рельсов, балластной призмы;
- иметь сопряжение блока рельсов с объёмным блоком многослойной земли с целью приближения к реальным условиям утечки токов вдоль пути;
- максимально учитывать взаимную индуктивность элементов тяговой сети;

Выполнение этих требований позволит учитывать в большей степени неоднородности тяговой сети, перечисленные в первой главе.

В данной главе рассмотрены модели однопутных и двухпутных участков с односторонним и двусторонним питанием и проведён сравнительный анализ результатов моделирования неоднородностей тяговой сети при различной степени детализации схем.

Следует отметить, что существующие аналитические модели или совсем не учитывают некоторые неоднородности тяговой сети, или учитывают их весьма упрощённо. По этой причине представленное далее моделирование выполнялось

поочерёдно для каждой отдельно взятой неоднородности, чтобы оценить эффективность её учёта. При этом напряжение холостого хода на шинах тяговых подстанций задавалось независимо от схемы внешнего электроснабжения.

### 3.2 Математический аппарат и программные средства моделирования

Основными элементами тяговой сети переменного тока являются комплексы собственных и взаимных сопротивлений проводов и рельсов. Покажем на простом примере, насколько трудоёмки аналитические преобразования, если не применять средства компьютерного моделирования.

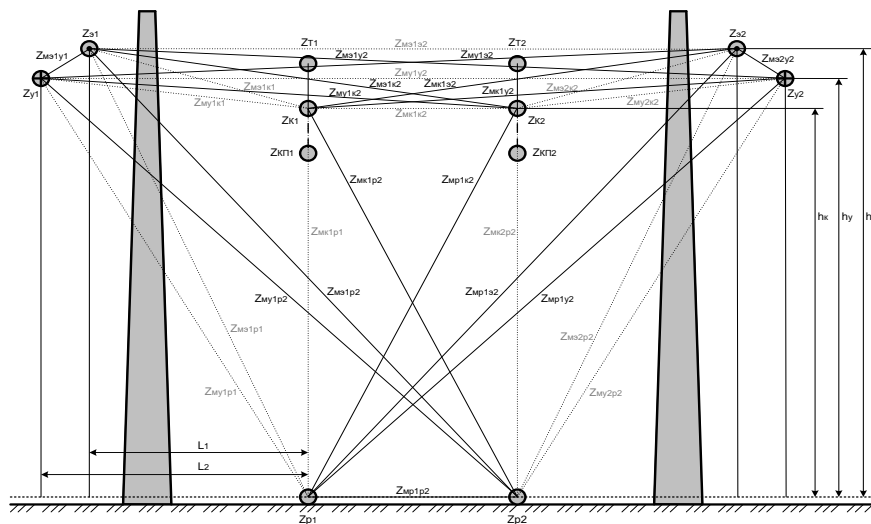


Рисунок 3.1 – Схема взаимных влияний элементов тяговой сети при системе электроснабжения с ЭУП двухпутного участка

Пусть, например, требуется найти сопротивление тяговой сети одного пути в многопроводной сети с ЭУП (рисунок 3.1). Вначале, как известно, определяется падение напряжения в тяговой сети с учетом взаимного электромагнитного влияния её элементов:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 = & \dot{I}_{\kappa 1} \cdot (\underline{z}_{\kappa 1} - \underline{z}_{\text{мк}1\text{п}1}) + \dot{I}_{\text{п}1} \cdot (\underline{z}_{\text{п}1} - \underline{z}_{\text{мк}1\text{п}1}) + \dot{I}_{\text{у}1} \cdot (\underline{z}_{\text{мк}1\text{у}1} - \underline{z}_{\text{мп}1\text{у}1}) + \\ & + \dot{I}_{\text{э}1} \cdot (\underline{z}_{\text{мп}1\text{э}1} - \underline{z}_{\text{мк}1\text{э}1}) + \dot{I}_{\kappa 2} \cdot (\underline{z}_{\text{мк}1\kappa 2} - \underline{z}_{\text{мп}1\kappa 2}) + \dot{I}_{\text{п}2} \cdot (\underline{z}_{\text{мп}1\text{п}2} - \underline{z}_{\kappa 1\text{п}2}) + \\ & + \dot{I}_{\text{у}2} \cdot (\underline{z}_{\text{мк}1\text{у}2} - \underline{z}_{\text{мп}1\text{у}2}) + \dot{I}_{\text{э}2} \cdot (\underline{z}_{\text{мп}1\text{э}2} - \underline{z}_{\text{мк}1\text{э}2}). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для получения численных значений сопротивлений необходимо найти распределение токов в проводниках, образующих тяговую сеть. Поделив выражение (3.1) на токи питающих присоединений, получают собственное и взаимное сопротивления по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{i_{k1}}{i_1} \cdot (\underline{z}_{k1} - \underline{z}_{mk1p1}) + \frac{i_{p1}}{i_1} \cdot (\underline{z}_{p1} - \underline{z}_{mk1p1}) + \frac{i_{y1}}{i_1} \cdot (\underline{z}_{mk1y1} - \underline{z}_{mp1y1}) + \\ &+ \frac{i_{\varepsilon 1}}{i_1} \cdot (\underline{z}_{mp1\varepsilon 1} - \underline{z}_{mk1\varepsilon 1}). \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вс}} &= \frac{i_{k2}}{i_2} \cdot (\underline{z}_{mk1k2} - \underline{z}_{mp1k2}) + \frac{i_{p2}}{i_2} \cdot (\underline{z}_{mp1p2} - \underline{z}_{k1p2}) + \frac{i_{y2}}{i_2} \cdot (\underline{z}_{mk1y2} - \underline{z}_{mp1y2}) + \\ &+ \frac{i_{\varepsilon 2}}{i_2} \cdot (\underline{z}_{mp1\varepsilon 2} - \underline{z}_{mk1\varepsilon 2}). \end{aligned}$$

Для получения токов в питающих присоединениях используют ряд допущений и упрощений таких, как, например, эквивалентирование проводов контактной сети, рельсовых нитей и т.п. Формулы, по которым можно выполнить такие преобразования и расчёты, являются достаточно трудоёмкими [47,71].

Определение места короткого замыкания в тяговых сетях связано с расчётом тока короткого замыкания и на этой основе получение параметров петли короткого замыкания. Чем подробнее будет составлена расчётная схема, чем больше в ней будет учтено неоднородностей тяговой сети, тем точнее будет определено место повреждения. Для успешного решения такой задачи требуется компьютерное моделирование с привлечением современного математического аппарата, обеспечивающего расчёт сложных схем тяговой сети.

Существующие компьютерные технологии позволяют не только упростить вычислительные операции, используя компьютер как калькулятор, но и заменить составление сложных расчётных формул компьютерным моделированием тяговых сетей. Особенно такая постановка актуальна при исследовании процессов в детализированных схемах тяговых сетей, имеющих множество элементов взаимного влияния. Численные значения отдельных элементов, из которых может быть построена детализированная модель, приведены в справочной литературе и работах [37, 71,75, 108, 109, 110].

В данной работе платформой моделирования избран Matlab, а математическим аппаратом – матричный анализ. В качестве теоретической основы матричного анализа были приняты работы [77, 78.79].

При расчете токов КЗ встречаются два варианта: первый, когда в момент короткого замыкания на электровозах наступает бестоковая пауза; второй, когда в момент короткого замыкания электровозы продолжают частично потреблять ток. В связи с этим предлагается два подхода использования матричных уравнений.

В первом случае расчетной является формула, позволяющая определить токи КЗ  $\dot{I}_{\text{кз}}$  в ветвях схемы электроснабжения при коротком замыкании:

$$\dot{I}_{\text{кз}} = N_t (N \underline{Z}_B N_t)^{-1} N \dot{E}, \quad (3.3)$$

где  $N$  – вторая матрица инциденций;

$N_t$  – транспонированная вторая матрица инциденций;

$\underline{Z}_B$  – матрица сопротивлений ветвей;

$\dot{E}$  – матрица ЭДС источников питания.

Во втором случае, когда необходимо учитывать токи электровозов, применяется обобщенное уравнение Кирхгофа в матричной форме [78]:

$$\begin{vmatrix} M \\ N \cdot \underline{Z}_B \end{vmatrix} \cdot \dot{I}_{\text{кз}} = \begin{vmatrix} \dot{J} \\ N \dot{E} \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

или сокращенно

$$A \cdot \dot{I}_{\text{кз}} = Q, \quad (3.5)$$

где  $M$  – первая матрица инциденций;

$\dot{I}_{\text{кз}}$  – токи в ветвях схемы при коротком замыкании;

$\dot{J}$  – матрица задающих токов поездов;

$A$  – блочная матрица, состоящая из первой матрицы инциденций  $M$  и подматрицы  $N \underline{Z}_B$ ;

$Q$  – блочная матрица активных параметров схемы, состоящая из подматрицы задающих токов  $\dot{J}$  и подматрицы контурных ЭДС  $\dot{E}$ .

Из уравнения (3.5) следует, что токи КЗ в ветвях схемы будут:

$$\dot{I}_{\text{кз}} = A^{-1} \cdot Q, \quad (3.6)$$

где  $A^{-1}$  – обратная матрица.

Расчеты по формуле (3.6) целесообразно выполнять, если порядок матриц  $A$  и  $Q$  не очень велик. При больших размерах этих матриц предпочтительно использовать для расчетов преобразованную матрицу уравнений, включающую матрицу инцидентий для дерева схемы.

При наличии задающих токов поездов  $j$ , токи в ветвях схемы  $i_{кз}$  можно представить на основании метода наложения [77] в виде суммы:

$$i_{кз} = i_k' + i'' \tag{3.7}$$

где  $i_k'$  – составляющая тока в ветвях схемы, связанная с контурными токами:

$$i_k' = N_t i_k \tag{3.8}$$

где  $i_k$  – вектор контурных токов,

$N_t$  – транспонированная вторая матрица инцидентий;

$i''$  – составляющая, связанная с токами поездов выражением:

$$i'' = \begin{vmatrix} M_\alpha^{-1} \\ 0 \end{vmatrix} j \tag{3.9}$$

где  $M_\alpha$  – первая матрица инцидентий для дерева схемы.

Таким образом, токи в ветвях схемы при учете влияния токов поездов будут иметь вид:

$$i_{кз} = N_t (N Z_B N_t)^{-1} N \dot{E} + \begin{vmatrix} M_\alpha^{-1} \\ 0 \end{vmatrix} j \tag{3.10}$$

Формула (3.10) может быть полезна при анализе влияния токов поездов на погрешность при определении удалённости места короткого замыкания.

Одним из важных преимуществ матричного анализа является то, что алгоритм решения уравнений (3.3) и (3.10) не зависит от схемы электроснабжения и степени её детализации. Кроме того, матрица сопротивлений ветвей  $Z_B$  достаточно просто учитывает собственные и взаимные сопротивления ветвей схемы. Для иллюстрации этого на рисунке 3.2 приведён фрагмент схемы электроснабжения, а в таблице 3.1 представлена соответствующая ему комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений  $Z_B$ .



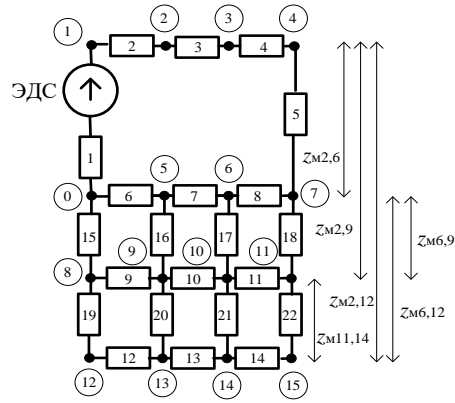


Рисунок 3.2 – Фрагмент расчетной схемы электроснабжения

В данной работе для автоматического построения матриц инцидентий  $N$ ,  $N_t$ ,  $M$  используется вспомогательная таблица схемы  $V$  (таблица 3.3), соответствующая схеме электроснабжения, содержащая связи ветвей с узлами, а также матрица ЭДС (таблица 3.2) в соответствии со схемой электроснабжения.

Таблица 3.2 – Матрица ЭДС  $E$

Номера ветвей	Значение ЭДС
1	27500
2	0
3	0
4	0
5	0
...	...
20	0
21	0
22	0

Таблица 3.3 – Таблица схемы  $V$

Номера ветвей	Номер узла на входе ветви	Номер узла на выходе ветви
1	0	1
2	1	2
3	2	3
4	3	4
5	4	5
...	.....	...
20	20	21
21	21	22
22	22	23



### 3.3 Исследование эффективности детализации элементов структуры тяговой сети при моделировании однопутного участка с односторонним питанием

#### 3.3.1 Моделирование элементов инфраструктуры тяговой сети рельсы-земля

В первой главе были перечислены неоднородности тяговой сети, которые потенциально могут влиять на точность определения места короткого замыкания. Контакт рельсов через балластную призму с землёй создает неоднородную проводящую структуру, которая характерна только для тяговых электрических сетей: ток в рельсах в этой структуре распределён неравномерно вдоль пути за счёт утечки токов в землю.

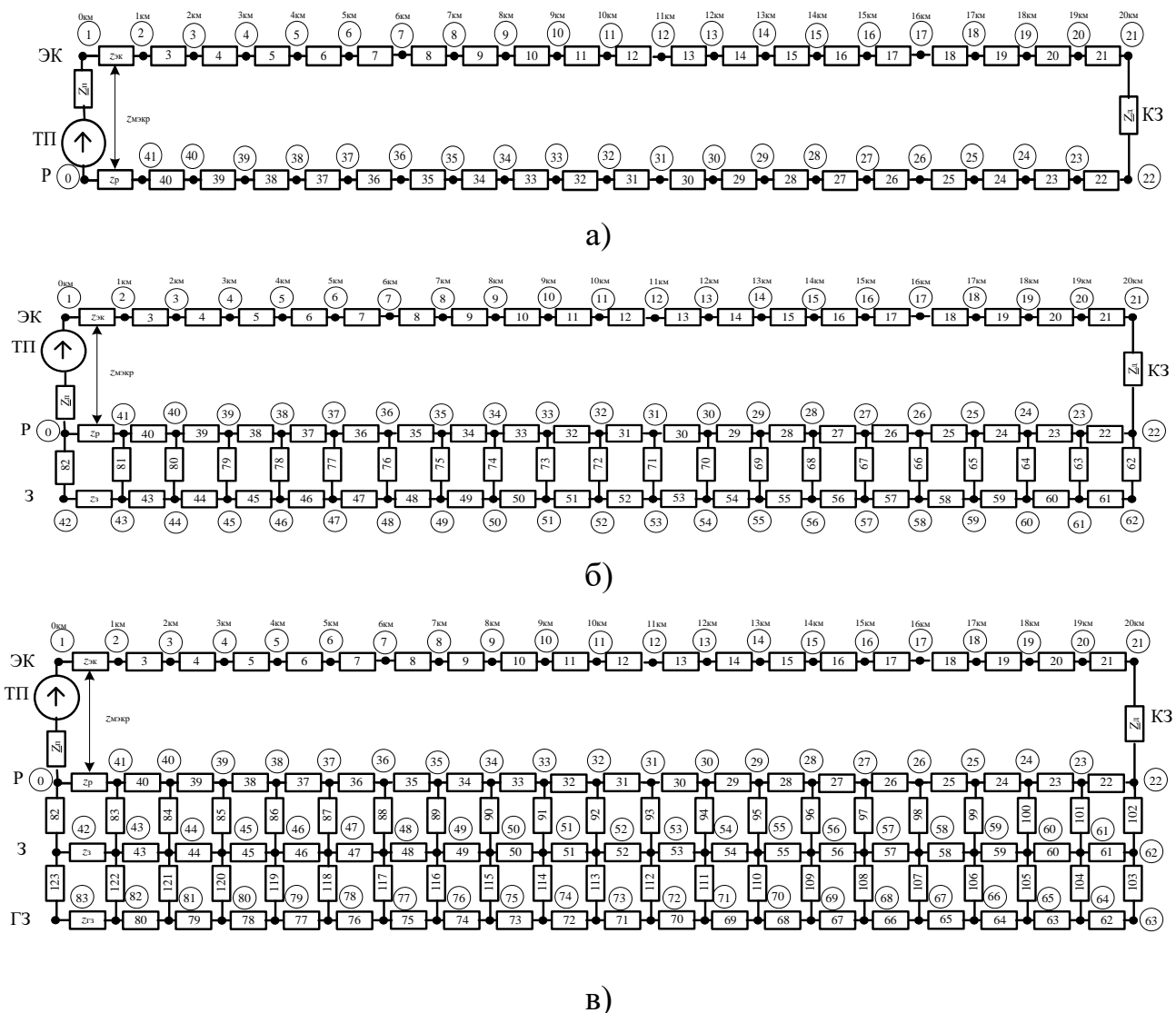


Рисунок 3.3 – Варианты моделей однопутного участка тяговой сети с односторонним питанием и различной степенью детализации: а – модель №1; б – модель №2; в – модель №3

Рассмотрим влияние степени детализации моделирования элементов инфраструктуры тяговой сети рельсы-земля на параметры петли короткого замыкания.

На рисунке 3.3 представлены три варианта моделей однопутного участка с односторонним питанием, в которых с различной степенью выполнена детализация только элементов рельсы-земля, но контактная сеть, при этом, оставлена эквивалентированной по известным формулам [37, 71, 75, 80].

На рисунке 3.3, а представлена модель №1, в которой рельсовая цепь представлена эквивалентированным сопротивлением рельсы – земля  $Z_p$ , что соответствует подходу, содержащемуся в работах [71, 75, 80]. В модели №2 (рисунок 3.3, б) применено размещение переходных сопротивлений рельсы-земля по длине участка, т.е. сделана попытка приближения схемы к реальным условиям. Это позволяет учесть неравномерное распределение токов в рельсах за счёт утечки токов в землю. В модели №3 (рисунок 3.3, в), по сравнению с моделью №2, смоделирована земля с верхним и нижним слоями на глубину 10 м.

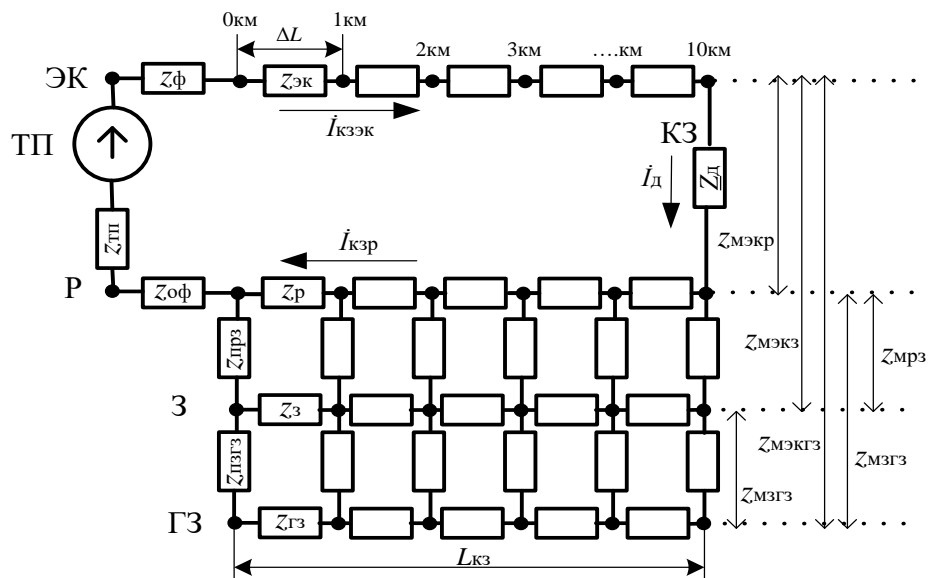


Рисунок 3.4 – Увеличенный фрагмент модели №3

На рисунке 3.4 приведён увеличенный фрагмент модели №3 для удобства рассмотрения обозначений рисунка 3.3, в.

На рисунках 3.3 и 3.4 приняты следующие обозначения:

ТП – тяговая подстанция;

ЭК – эквивалентированная контактная сеть;

Р – рельсовая цепь;

З – верхний слой земли;

ГЗ – глубокий слой земли;

КЗ – место короткого замыкания;

$\Delta L$  – шаг разбиения тяговой сети;

$L_{\text{КЗ}}$  – расстояние до места КЗ;

$i_{\text{КЗЭК}}$  – ток короткого замыкания в ЭК от ТП до места КЗ;

$i_{\text{КЗР}}$  – ток короткого замыкания в рельсовой цепи от места КЗ до ТП;

$i_{\text{д}}$  – ток короткого замыкания в месте КЗ;

$z_{\text{ЭК}}$  – удельное эквивалентное сопротивление контактной сети, Ом/км;

$z_{\text{р}}$  – удельное сопротивление рельсовой цепи, Ом/км;

$z_{\text{прз}}$  – удельное переходное сопротивление рельсы поверхность земли (балластной призмы);

$z_{\text{з}}$  – удельное сопротивление верхнего слоя земли, Ом/км;

$z_{\text{пзгз}}$  – переходное сопротивление поверхность земли глубокая земля;

$z_{\text{гз}}$  – удельное сопротивление глубокой земли, Ом/км;

$z_{\text{мэкр}}$  – удельное сопротивление взаимоиנדукции между контурами контактная сеть – рельсы, Ом/км;

$z_{\text{мэкз}}$  – удельное сопротивление взаимоиנדукции между контурами контактная сеть – земля, Ом/км;

$z_{\text{мэкгз}}$  – удельное сопротивление взаимоиנדукции между контурами контактная сеть – глубокая земля, Ом/км;

$z_{\text{мрз}}$  – удельное сопротивление взаимоиנדукции между контурами рельсы – земля, Ом/км;

$z_{\text{мргз}}$  – удельное сопротивление взаимоиנדукции между контурами рельсы – глубокая земля, Ом/км;

$z_{\text{мзг}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контурами земля – глубокая земля, Ом/км;

$Z_{\text{п}}$  – сопротивление тяговой подстанции, Ом;

$Z_{\text{д}}$  – сопротивление дуги, Ом.

Численные значения элементов моделей принимались для следующих условий: рельсы Р65; контактная подвеска ПБСМ70+МФ100; переходное сопротивление балластной призмы 3 Ом; проводимость земли  $5 \cdot 10^{-3}$  См/м; расстояние между контактной сетью и рельсами 6,55м.

На рисунках 3.5 - 3.9 представлены результаты влияния степени детализации моделей на параметры петли короткого замыкания при глухом КЗ.

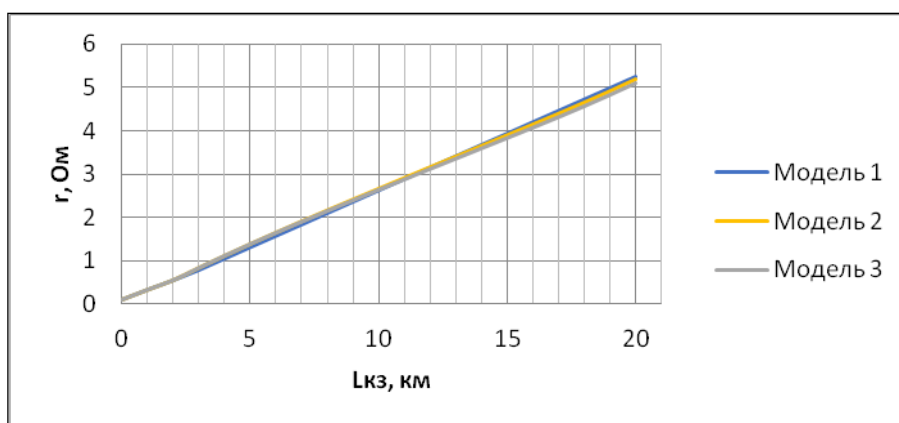


Рисунок 3.5 – Влияние степени детализации модели на активную составляющую сопротивления петли КЗ

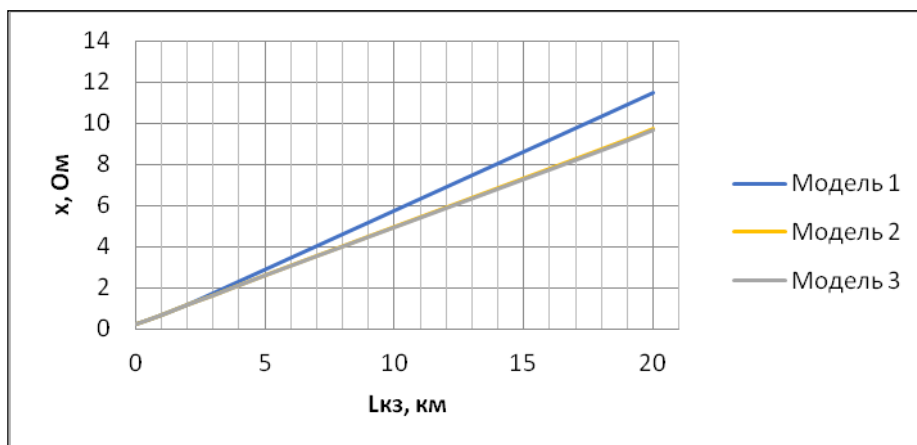


Рисунок 3.6 – Влияние степени детализации модели на индуктивное сопротивление петли КЗ

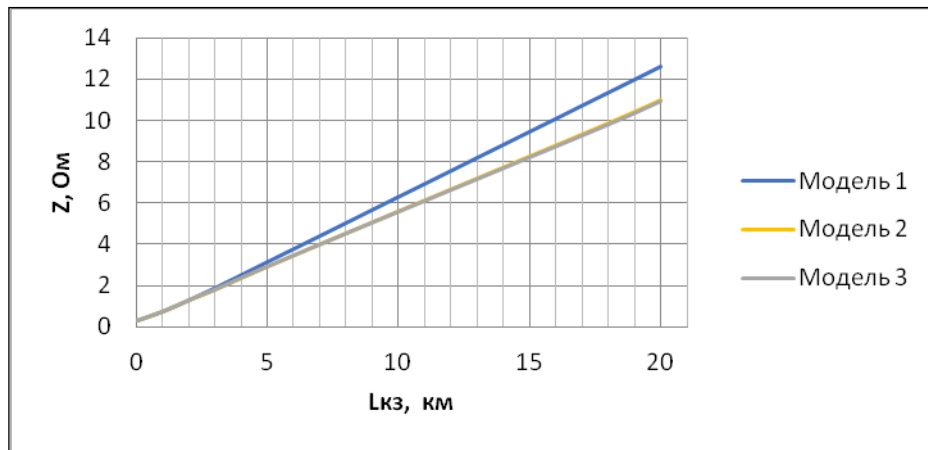


Рисунок 3.7 – Влияние степени детализации модели на полное сопротивление петли КЗ

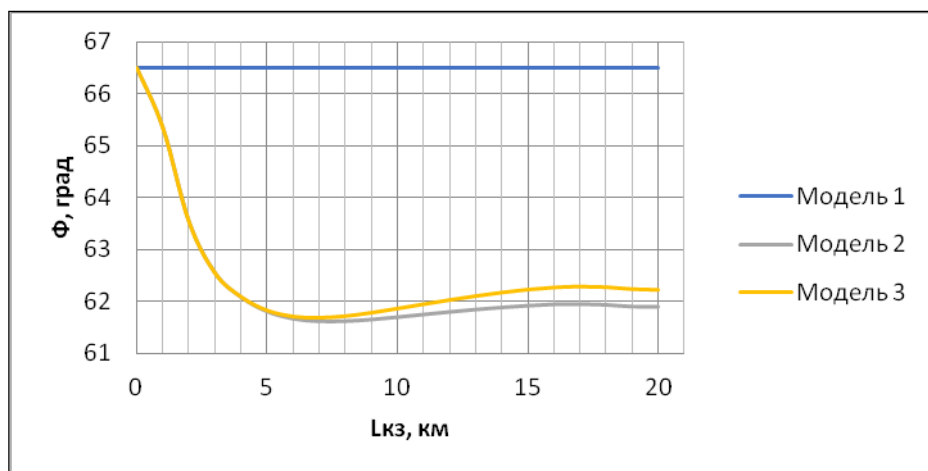


Рисунок 3.8 – Влияние степени детализации модели на фазовые углы петли КЗ

Анализ представленных графиков показывает по каждому отдельно параметру, что детализация элементов рельсовой цепи и земли на модели № 3, уменьшает погрешности в определении места повреждения при глухом КЗ по сравнению с моделью №1 максимум:

- по активной составляющей на 3,77%;
- по индуктивной составляющей на 21,74% ;
- по полному сопротивлению на 14,06%;
- по фазовому углу на 5,87%.

На графиках в приложении П1.4-П1.7 представлены результаты влияния степени детализации моделей на параметры петли КЗ при КЗ с дугой 3 Ом.

В результате можно сделать вывод о том, что детализация элементов рельсовой цепи и земли на модели №3, уменьшает погрешности в определении места повреждения при КЗ с сопротивлением дуги 3 Ом по сравнению с моделью №1:

- по активной составляющей на 2,41%;
- по индуктивной составляющей на 16,52% ;
- по полному сопротивлению на 11,35%;
- по фазовому углу на 9,09%.

Как видно из приведенных результатов, утечка токов значительно влияет на составляющие сопротивлений петли КЗ. Наибольшее влияние степень детализации моделей оказывает на индуктивную и полную составляющую петли короткого замыкания.

Применение осредненного сопротивления рельсовой цепи не даёт точной картины о процессах в тяговой сети в момент КЗ.

Для оценки степени соответствия модели №3 реальным объектам, было проведено сравнение распределения токов короткого замыкания в рельсах, полученных на модели, с опубликованными результатами экспериментов, проведенных на действующих электрифицированных участках железных дорог [102].

На модели №3 было проведено короткое замыкание на 20 км с дугой 3 Ом. Распределение тока КЗ в рельсах, в верхнем и нижнем слоях земли представлены на рисунке 3.9.

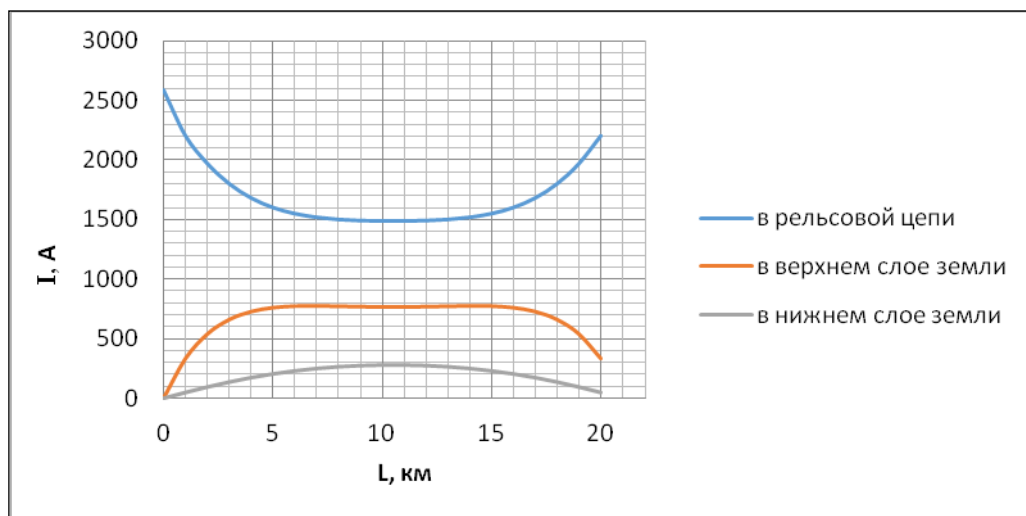


Рисунок 3.9 – Графики распределения токов в рельсах, в верхнем и нижнем слоях земли при КЗ на 20км (рис.3.3 в, модель № 3)



Экспериментальные исследования, проведенные в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН на действующем однопутном участке переменного тока [102] показали, что доля тока в рельсах составляет 45-65% от тягового тока. Это соответствует результатам, представленным на рисунке 3.9 и подтверждает адекватное моделирование процессов на модели №3.

На модели №3 были получены направления протекания составляющих тока в тяговой сети, представленные на рисунке 3.10. Стрелками синего цвета показано направление индуктивной составляющей тока, а стрелками красного цвета – активной составляющей.

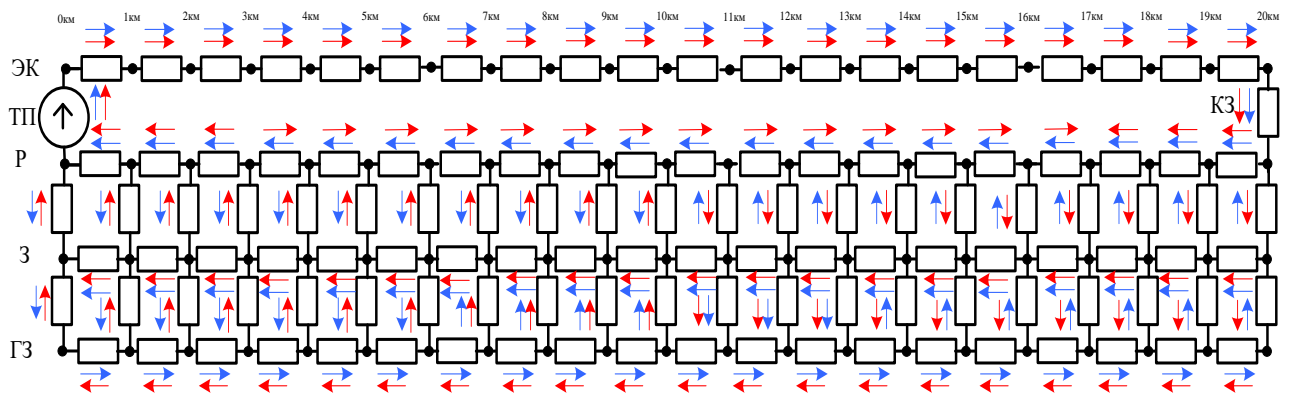


Рисунок 3.10 – Направление токов в тяговой сети однопутного участка одностороннего питания

Результаты исследования распределения тока в тяговой сети подтверждают адекватность представленной модели №3.

### 3.3.2 Моделирование тросов группового заземления

Особыми элементами тяговой сети являются тросы группового заземления. В нормальных условиях при наличии искровых промежутков трос группового заземления гальванически не связан ни с рельсами, ни с проводами контактной сети. В групповом тросе будет лишь наведенное напряжение через сопротивление взаимной индукции с контактной сетью.

В момент короткого замыкания связь рельсов с контактной сетью будет чаще проходить через дугу на изоляторах консоли и подобие дуги в искровом



На железных дорогах ТГЗ используется длиной около 200 м. В данном примере использовался трос марки АС95. На модели были рассчитаны два варианта схем:

- с использованием ТГЗ при глухом КЗ;
- без ТГЗ при глухом КЗ.

Эти варианты рассмотрены без учёта дуги, чтобы оценить влияние ТГЗ на параметры петли короткого замыкания. В таблице 3.4 представлены значения параметров петли КЗ для двух вариантов моделирования.

Таблица 3.4 – Значения параметров сопротивления петли КЗ

L <sub>кз</sub> , км	0	5	10	15	20	Параметры КЗ
с ТГЗ, Z <sub>д</sub> =0 ом	0,07	1,41	2,67	3,89	5,14	r, Ом
	0,30	2,31	4,09	5,85	7,68	x, Ом
	0,31	2,71	4,88	7,02	9,24	Z, Ом
	77,33	58,62	56,92	56,37	56,22	Φ, град
без ТГЗ, Z <sub>д</sub> =0 ом	0,06	1,58	2,91	4,20	5,54	r, Ом
	0,29	2,43	4,19	5,94	7,82	x, Ом
	0,30	2,90	5,10	7,28	9,58	Z, Ом
	77,72	56,99	55,26	54,76	54,70	Φ, град

По данным таблицы 3.4 получены следующие отклонения параметров петли КЗ, полученных на модели с ТГЗ и без ТГЗ при КЗ на 20 км:

- по активной составляющей сопротивления петли КЗ: 7,22%;
- по индуктивной составляющей сопротивления петли КЗ: 1,79%;
- по полному сопротивлению петли КЗ: 3,55%;
- по фазовому углу петли КЗ: 2,78%.

Графические зависимости влияния ТГЗ на параметры петли короткого замыкания представлены в приложениях П1.5–П1.8.

### 3.3.3 Моделирование износа контактного провода

Компьютерное моделирование позволяет сравнительно просто учесть неоднородность контактной сети, связанную с износом контактного провода.

Влияние износа контактного провода рассмотрено для схемы однопутного участка одностороннего питания (рисунок 3.12). Учитывался износ контактного

провода 15% на расстоянии с 5 по 10 км от подстанции ТП. Результаты моделирования представлены на зависимостях в приложении П1.9-1.12.

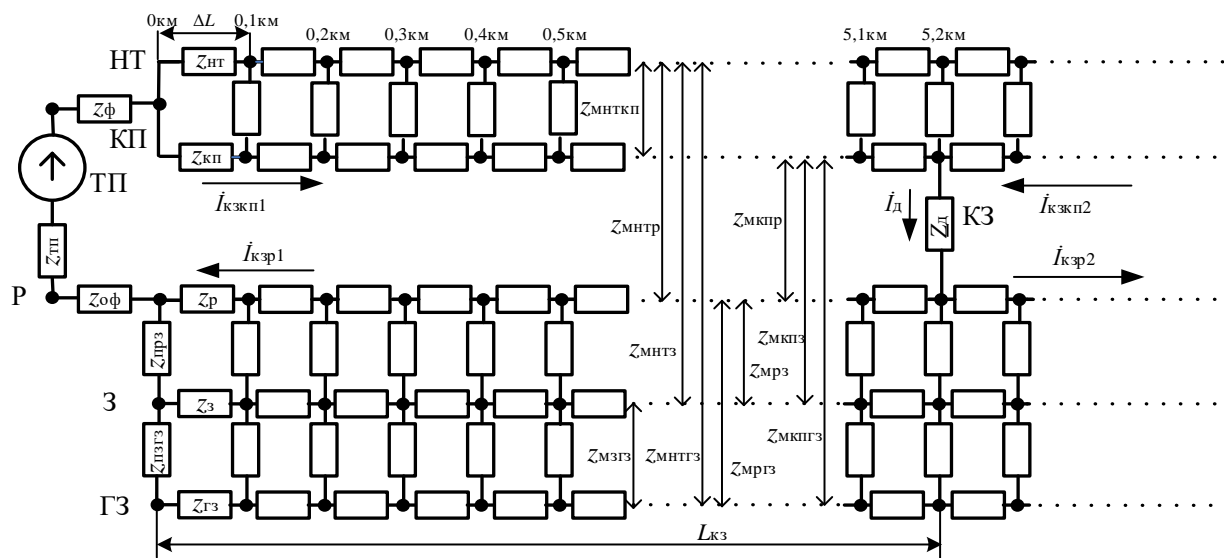


Рисунок 3.12 – Фрагмент схемы однопутного участка одностороннего питания для учёта влияния износа контактного провода с отдельным моделированием контактного провода и несущего троса

На основе приведенных графиков получены следующие расхождения параметров петли КЗ нового контактного провода по отношению к изношенному:

- по активной составляющей 2,86 %;
- по индуктивной составляющей 4,91%;
- по полному сопротивлению 5,03%;
- по фазному углу 0,93%.

Как видно, учет износа проводов существенно влияет на повышение точности метода.

### 3.4 Исследование эффективности детализации элементов структуры тяговой сети при моделировании двухпутного участка с двусторонним питанием

#### 3.4.1 Моделирование элементов структуры тяговой сети рельсы-земля

Контакт рельсов через балластную призму с землёй создает неоднородную проводящую структуру, которая характерна только для тяговых электрических

сетей: ток в рельсах в этой структуре распределён неравномерно вдоль пути за счёт утечки токов в землю.

Рассмотрим влияние степени детализации элементов тяговой сети рельсы-земля двухпутного участка двустороннего питания на удельное сопротивление тяговой сети и параметры петли короткого замыкания на примере трёх вариантов моделей двухпутного участка с двусторонним питанием и постом секционирования, представленных на рисунке 3.13.

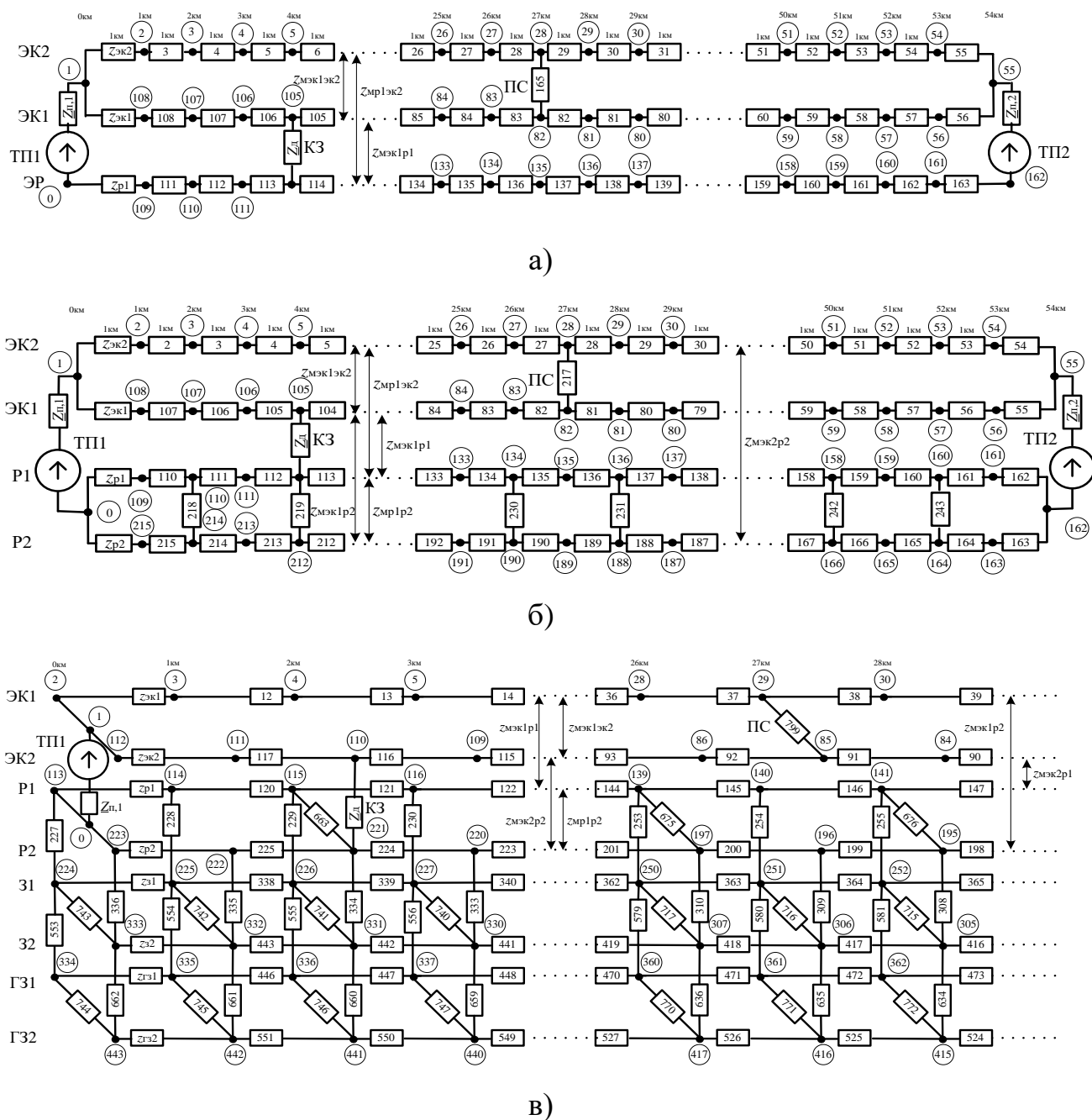


Рисунок 3.13 – Варианты моделей двухпутного участка с двусторонним питанием и постом секционирования: а – модель №4; б – модель №5; в – модель №6

Модель №4 (рисунок 3.13, а)– известная модель [71, 75, 80], в которой контактные сети путей разделены, а рельсы обоих путей эквивалентированны одной нитью.

В модели №5 (рисунок 3.13, б) рельсы представлены на каждом пути отдельными нитями, с междупутными связями рельсовых цепей и взаимно индуктивными связями путей.

Модель №6 (рисунок 3.13, в) имеет элементы, имитирующие разделённые рельсовые цепи с междупутными соединителями, балластную призму и землю с верхним и нижним слоями, которые связаны между собой. Для удобства рассмотрения обозначений, принятых на рисунке 3.13, на рисунке 3.14 представлен ее укрупнённый фрагмент.

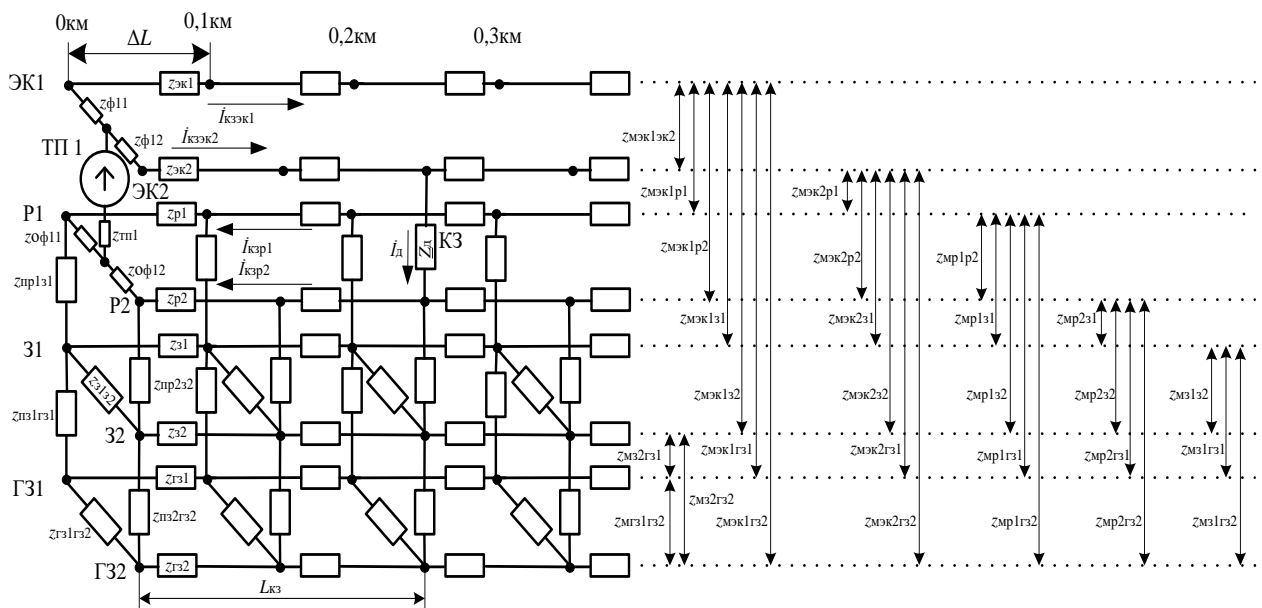


Рисунок 3.14 – Фрагмент модели двухпутного участка двустороннего питания тяговой сети

На схеме (рисунок 3.14) не показаны сопротивления поперечных соединений между рельсовым путем первого и второго пути  $Z_{P1P2}$ . Однако, они учтены и расположены через каждые 2 км (модель 6, рисунок 3.13, в). Взаимные сопротивления всех элементов тяговой сети учтены и показаны стрелками (рисунок 3.14). Длина межподстанционной зоны 54 км.

На рисунках 3.13 – 3.14 приняты следующие обозначения:

$z_{\text{эк1}}$  – удельное собственное эквивалентное сопротивление контактной сети 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{эк2}}$  – удельное собственное эквивалентное сопротивление контактной сети 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{р1}}$  – удельное сопротивление рельсовой цепи 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{р2}}$  – удельное сопротивление рельсовой цепи 2-го пути, Ом/км;

$Z_{\text{пр1з1}}$  – удельное переходное сопротивление рельсы первого пути - земля;

$Z_{\text{пр2з2}}$  – удельное переходное сопротивление рельсы второго пути - земля;

$Z_{\text{з1з2}}$  – удельное взаимное сопротивление между контурами земли 1-го и 2-го пути;

$Z_{\text{з2з1}}$  – удельное взаимное сопротивление между контурами земли 2-го и 1-го пути;

$z_{\text{п.1}}, z_{\text{п.2}}$  – сопротивление тяговых подстанций 1 и 2, Ом;

$z_{\text{мэк1эк2}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и контактной сетью 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1р1}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и рельсовой цепью 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1р2}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и рельсовой цепью 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1з1}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1з2}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1гз1}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэк1гз2}}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 1-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2p1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и рельсовой цепью 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2p2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и рельсовой цепью 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2з1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2з2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2гз1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мэ}k2гз2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между контактной сетью 2-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}1p2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 1-го пути и рельсовой цепью 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}1з1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 1-го пути и землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}1з2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 1-го пути и землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}1гз1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 1-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}1гз2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 1-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}2з1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 2-го пути и землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}2з2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 2-го пути и землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{\text{мп}2гз1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 2-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;



$z_{mp2г2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между рельсовой цепью 2-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{mз1з2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между землей 1-го пути и землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{mз1гз1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между землей 1-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{mз1гз2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между землей 1-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{mз2гз1}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между землей 2-го пути и глубокой землей 1-го пути, Ом/км;

$z_{mз2гз2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между землей 2-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

$z_{mгз1гз2}$  – удельное сопротивление взаимоиндукции между глубокой землей 1-го пути и глубокой землей 2-го пути, Ом/км;

ЭК1, ЭК2 – эквивалентные контактные сети первого и второго пути;

Р1, Р2 – рельсовые цепи 1-го и 2-го пути;

З1, З2 – верхние слои земли 1-го и 2-го пути;

ГЗ1, ГЗ2 – нижние слои земли 1-го и 2-го пути;

$Z_{ЭК1}, Z_{ЭК2}$  – сопротивления эквивалентных контактных сетей 1-го и 2-го пути;

$Z_{Р1}, Z_{Р2}$  – сопротивления рельсовых цепей 1-го и 2-го пути;

$Z_{З1}, Z_{З2}$  – сопротивления верхних слоёв земли первого и второго пути;

$Z_{ГЗ1}, Z_{ГЗ2}$  – сопротивления глубоких слоёв земли 1-го и 2-го пути;

$Z_{ПР1з1}, Z_{ПР2з2}$  – переходные сопротивления рельсы-земля 1-го и 2-го пути;

$Z_{ПЗ1ГЗ1}, Z_{ПЗ2ГЗ2}$  – переходные сопротивления земля-глубокая земля 1-го и 2-го пути;

$Z_{з1з2}$  – сопротивление поперечного соединения верхнего слоя земли между 1-ым и 2-ым путем;

$Z_{ГЗ1ГЗ2}$  – сопротивление поперечного соединения глубокого слоя земли между 1-ым и 2-ым путем;

$Z_{Ф11}$  – сопротивление питающего присоединения ТП 1 1-го пути;

$Z_{Ф12}$  – сопротивление питающего присоединения ТП 1 второго пути;

$Z_{Ф21}$  – сопротивление питающего присоединения ТП 2 первого пути;

$Z_{Ф22}$  – сопротивление питающего присоединения ТП 2 второго пути;

$Z_{ОФ11}$  – сопротивление отсасывающего фидера ТП 1 первого пути;

$Z_{ОФ12}$  – сопротивление отсасывающего фидера ТП 1 второго пути;

$Z_{ОФ21}$  – сопротивление отсасывающего фидера ТП 2 первого пути;

$Z_{ОФ22}$  – сопротивление отсасывающего фидера ТП 2 второго пути;

$Z_{МЭК1Р1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Р1;

$Z_{МЭК1Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Р2;

$Z_{МЭК1ЭК2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и ЭК2;

$Z_{МЭК2Р1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Р1;

$Z_{МЭК2Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Р2;

$Z_{МР1Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и Р2;

$i_{КЗЭК1}$  – ток короткого замыкания в ЭК1 от ТП 1 до ПС;

$i_{КЗЭК2}$  – ток короткого замыкания в ЭК от ТП 1 до места КЗ;

$i_{КЗР1}$  – ток короткого замыкания в рельсовой цепи первого пути;

$i_{КЗР2}$  – ток короткого замыкания в Р2 от места КЗ до ТП 1.

Моделирование серии глухих КЗ проводилось без участия дуги. Короткие замыкания производились через каждый километр от подстанции до поста секционирования, расположенного на 26 км. По результатам моделирования вычислялись удельные сопротивления тяговой сети для схем двухпутного участка (приложение П1.13-1.16).

На приведенных графиках (приложение П1.13-1.16) видно, что по мере увеличения детализации моделей возрастает расхождение результатов

моделирования, меняется характер графиков: вместо гладких, графики стали волнистыми. Наибольшие расхождения удельных сопротивлений традиционной модели №4 и модели №6, наблюдаются, например, для индуктивной составляющей на 21 км и составляет 0,15 Ом/км. Волнистый характер графиков в моделях №5 и №6 объясняется тем, что в моделях учитываются поперечные связи рельсовых цепей и утечка токов в землю. Нужно отметить, что учёт этих связей практически невозможен при аналитическом моделировании.

Максимальное расхождение удельного сопротивления тяговой сети в модели №4 относительно моделей №5 и №6 может достигать:

- по активной составляющей – 12,73%;
- по индуктивной составляющей – 16,36%;
- по полному сопротивлению – 12,07%.

Кроме того, исследовалось влияние степени детализации моделей №№ 4,5,6 на параметры петли короткого замыкания. Моделирование производилось без учёта и с учётом влияния дуги. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.15-3.18 при отсутствии дуги и в приложениях П1.17-1.20 при сопротивлении дуги 3 Ом.

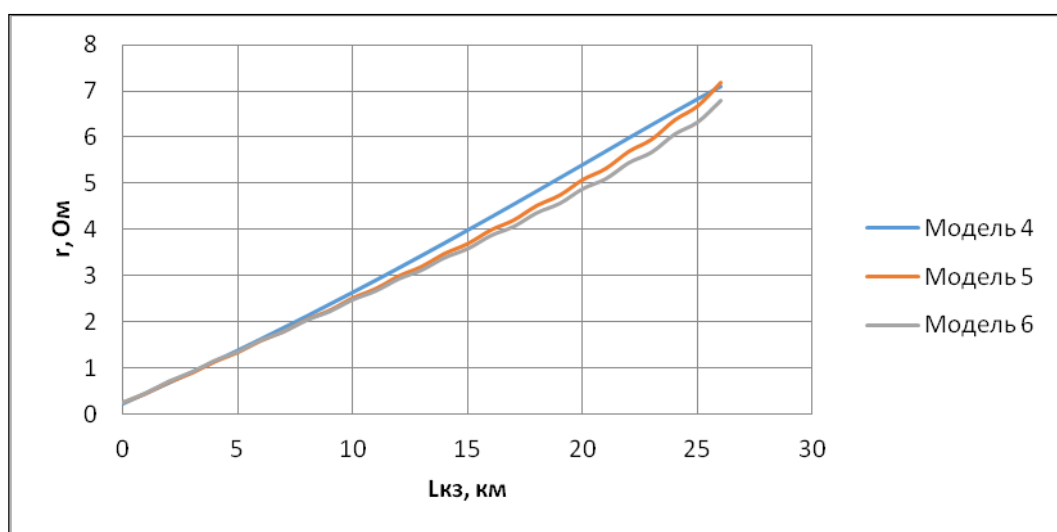


Рисунок 3.15 – Влияние степени детализации модели на активную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 0 Ом

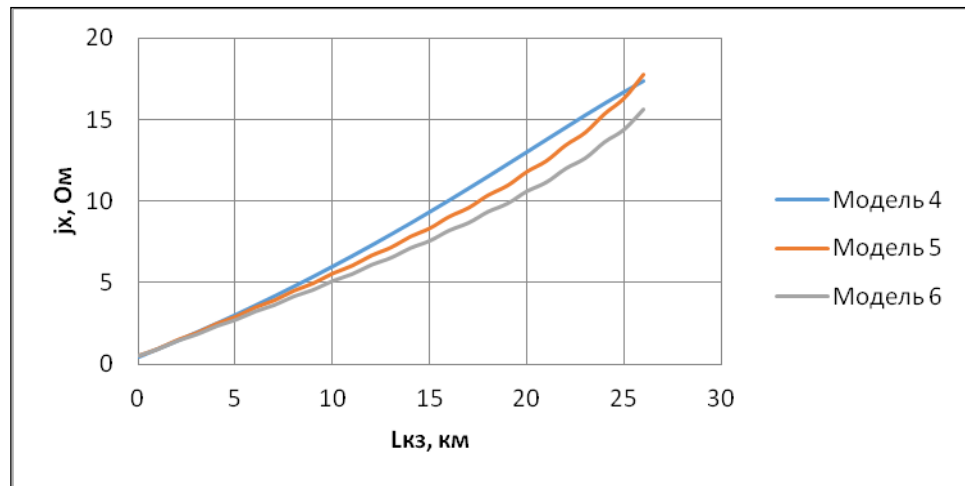


Рисунок 3.16 – Влияние степени детализации модели на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 0 Ом

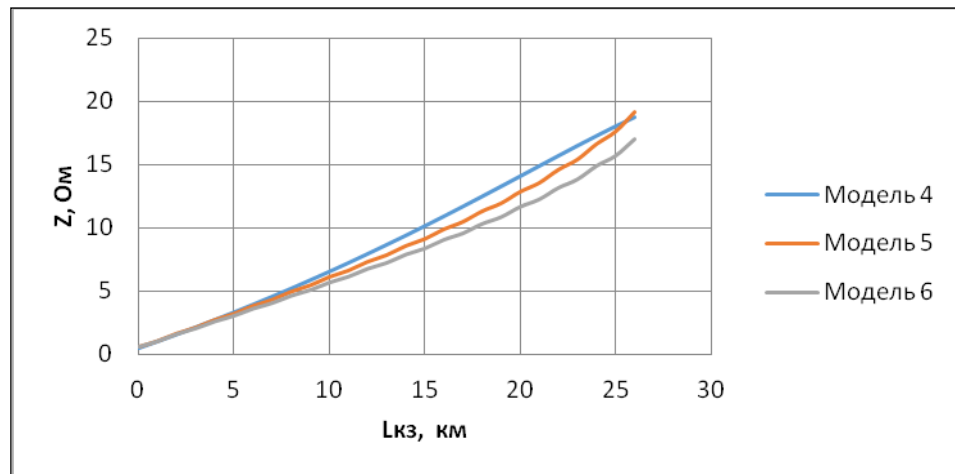


Рисунок 3.17 – Влияние степени детализации модели на полное сопротивление петли КЗ при сопротивлении дуги 0 Ом

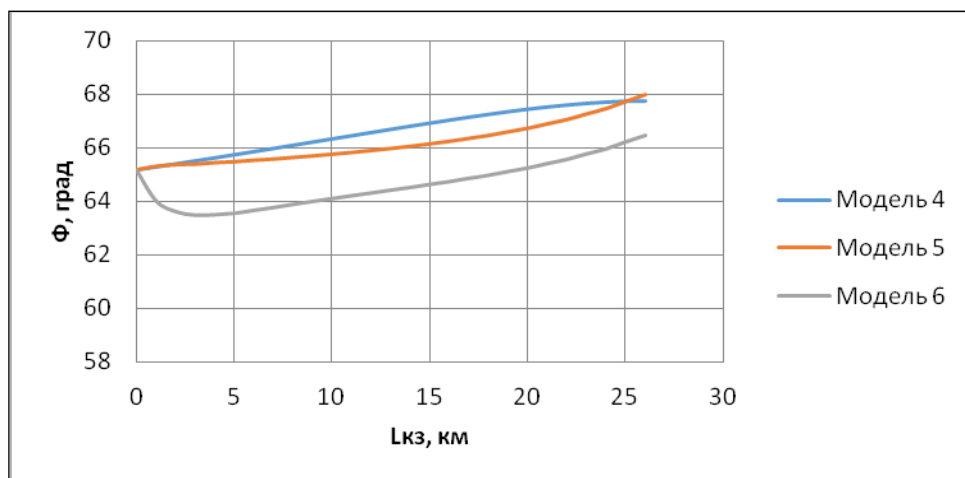


Рисунок 3.18 – Влияние степени детализации модели на фазовый угол сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 0 Ом

Максимальные расхождения при определении места глухого КЗ по параметрам петли, полученные на модели №4 по сравнению с моделью №6 на двухпутном участке двустороннего питания, составляют:

- по активной составляющей – 9,84%;
- по индуктивной составляющей– 17,24%;
- по полному сопротивлению– 18,75%;
- по фазовому углу – 3,7%.

Максимальные расхождения при определении места повреждения по параметрам петли КЗ с учётом влияния дуги сопротивлением 3 Ом, полученные на модели №4 по сравнению с моделью №6 на двухпутном участке двустороннего питания, составляют:

- по активной составляющей– 39,5 %;
- по индуктивной составляющей– 20 %;
- по полному сопротивлению– 38,88 %;
- по фазовому углу – 29,41 %.

### **3.4.2 Влияние сезона на параметры петли короткого замыкания**

Переходное сопротивление рельсы-земля, как известно [39, 75, 76], зависит от сезона. Диапазон значений переходного сопротивления достаточно велик: от 0,5 Ом·км при влажном грунте, до 25 Ом·км при сильном промерзании грунта.

На модели №6 исследовалось влияние изменения переходного сопротивления на параметры петли короткого замыкания при изменении сезона, При этом предполагалось, что изменение сезона привело к изменению переходного сопротивления балластной призмы с  $\underline{Z}_{\Pi}=1$  Ом·км на  $\underline{Z}_{\Pi}=10$  Ом·км. Глухое короткое замыкание моделировалось на 27 км от ТП 1. Напряжения на подстанциях принимались одинаковыми. Результаты исследования представлены в приложении П1.21-1.24.

Как видно из представленных материалов учёт изменения сезона следующим образом влияет на расхождение параметров петли КЗ:

- по активной составляющей на 6,06%;

- по индуктивной составляющей на 1,92%;
- по полному сопротивлению на 2,38%;
- по фазовому углу на – 2,04%.

### 3.4.3 Влияние уширения междупутья на параметры петли короткого замыкания

В первой главе было отмечено, что на отдельных участках тяговой сети могут существовать неоднородности в виде изменения расстояния между осями путей (уширения междупутья) по условиям местности. Это сопровождается изменением сопротивления взаимной индукции между контурами контактных подвесок путей.

На рисунке 3.19 представлена схема межподстанционной зоны двухпутного участка длиной 54 км, с постом секционирования на 27 км. На рисунке видно, что контактная сеть первого пути отстоит от основной оси первого пути на 15 м на участке пути длиной 17 км. На модели №6 (рисунок 3.13, в) проведено исследование влияния уширения междупутья на удельное сопротивление тяговой сети и параметры петли КЗ. Результаты исследования при глухом коротком замыкании представлены на графиках в приложении П1.25-1.28.

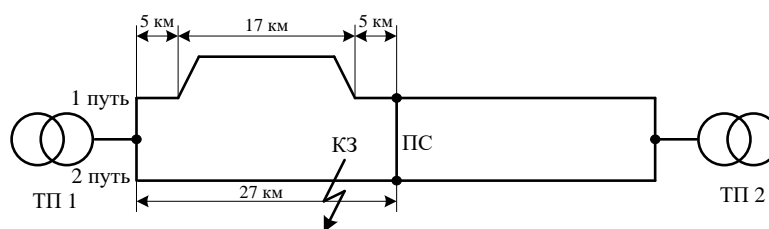


Рисунок 3.19 – Схема тяговой сети с уширенным междупутьем

Из графиков, приведенных в П1.25-1.28 видно, что при КЗ на 25 км не учёт уширения междупутья приведёт к ошибке определения места КЗ :

- по активной составляющей – 6,98%;
- по индуктивной составляющей – 10,83%;
- по полному сопротивлению – 7,06%;
- по фазовому углу – 3,46%.

Приведенные результаты показывают, что учёт уширения междупутья на отдельных участках пути существенно влияет на повышение точности определения места короткого замыкания.

### 3.5 Исследование влияния токов короткого замыкания на удельное сопротивление рельсовой цепи

При расчётах показателей нормальных режимов работы системы тягового электроснабжения (потерь напряжения, потерь мощности и др.) принимают допущение о том, что сопротивление рельсов  $z_p$  не зависит от протекающего тока. При относительно небольших токах нормального режима это создаёт допустимые погрешности в поставленных задачах.

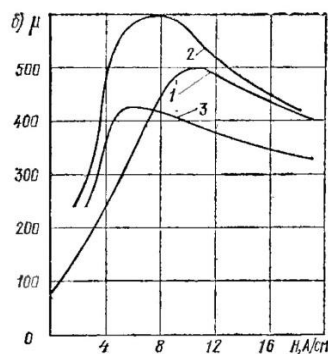


Рисунок 3.20 – Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для железнодородных рельсов

На рисунке 3.20 кривая 1 построена по данным ЛИИЖТ; кривая 2 - по данным ВЭИ; кривая 3 - по данным магнитной лаборатории Академии наук СССР [55].

При коротких замыканиях ток в рельсах может принимать значение нескольких сотен ампер на одну рельсовую нить (рисунок 3.21), что значительно превышает ток рабочего режима. При таких значениях, как видно из рисунка 3.20, ток может влиять на относительную магнитную проницаемость рельсовой стали и сопротивление рельсовой цепи [55]. Таким образом, представляет интерес моделирование тока в рельсах для уточнения сопротивления рельсов в зависимости от величины протекающих токов КЗ [70].

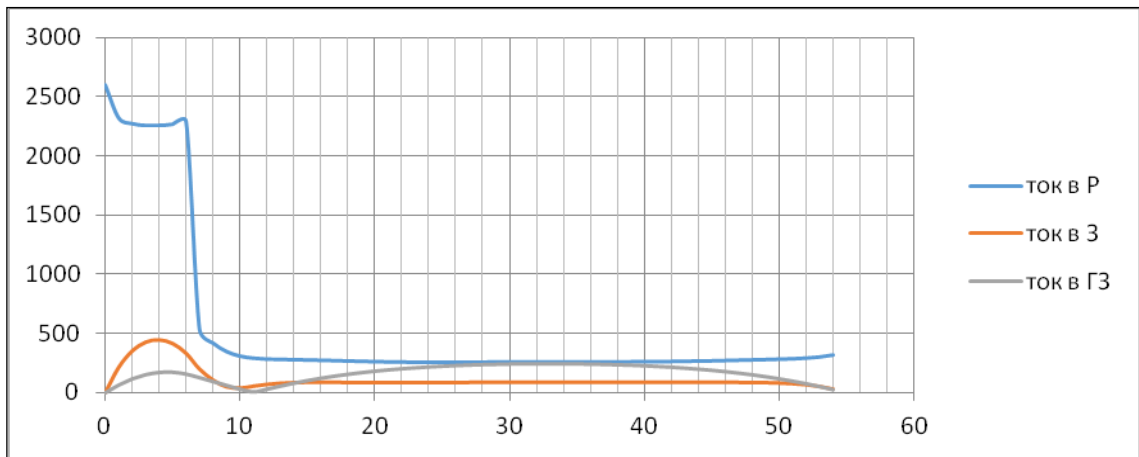


Рисунок 3.21– Распределение тока близкого КЗ в тяговой сети при схеме двустороннего питания

Кроме того, следует учитывать, что величина тока короткого замыкания в рельсах зависит от места короткого замыкания, поскольку на распределение тока в рельсах влияет степень утечки его в землю. На этот процесс, в свою очередь, влияют свойства балластной призмы и грунта. На диаграмме рисунка 3.21 видно, что ток в рельсах неравномерно распределяется вдоль пути.

Неравномерность тока в рельсах создаёт неодинаковое погонное сопротивление рельсовой цепи. Эту неоднородность достаточно сложно учесть аналитически. В главе 1 отмечалось, что в аналитических методах с целью повышения точности определения места КЗ влияние утечки токов решают путём итерационного подбора средних значений коэффициента утечки « $\nu$ ».

Как было уже показано выше компьютерное моделирование позволяет решить эту проблему иначе – путём моделирования рельсовой цепи, балластной призмы и земли. Компьютерное моделирование позволяет схемным путём учесть распределение тока в рельсах с учётом свойств балластной призмы и земли. Выше было показано (раздел 3.3-3.4), что учёт фактора утечки токов хорошо осуществляется на моделях №2, №3, №5 и №6, в которых рельсы, переходное сопротивление и земля представлены самостоятельными элементами.

Учёт влияние тока КЗ на сопротивление рельсов представляет специальную задачу. Компьютерная модель позволяет разбить участок рельсовой цепи на отрезки длиной  $\Delta x$  (например, 1км) и определять сопротивление каждого такого



отрезка с учётом протекающего по нему тока. Идея такого подхода изложена в работе [81]. Существуют методики, которые позволяют по известному току рассчитать соответствующее сопротивление рельсов [55, 71].

При токах короткого замыкания напряжённость магнитного поля может превышать порог насыщения рельсовой стали  $H=10-12$  А/см. С ростом тока КЗ активное и индуктивное сопротивления рельсов будут изменяться в соответствии с кривой намагничивания  $\mu=\psi(H)$ . В методике [55] расчёты активного и реактивного сопротивлений рекомендуется производить по формулам:

$$r_{PX} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{P} \sqrt{\mu_X} \cdot k_{rH}, \quad x_{PX} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{P} \sqrt{\mu_X} \cdot k_{xH}, \quad \text{Ом/км} \quad (3.11)$$

где  $P$  – периметр рельса, см;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/см;

$\mu$  – магнитная проницаемость стали, Гн/м;

$k_{rH}$  и  $k_{xH}$  – безразмерные коэффициенты, которые определяются с учётом следующих условий:

- при  $0 \leq H_X \leq 1,2$  кА/м  $k_{rH} = 0,76\sqrt{1+0,423H_X^3}$ ,  $k_{xH} = 0,6\sqrt{1+0,766(1,2-H_X)^2}$ ;

- при  $H > 1,2$  кА/м  $k_{rH} = 1$ ,  $k_{xH} = 0,6$ .

Зная сопротивления  $r_{PX}$  и  $x_{PX}$  отдельных отрезков  $\Delta x$  одиночного рельса, вычисляют полное сопротивление  $z_{PX}$  отдельных отрезков рельсов  $\Delta x$  одного пути:

$$z_{PX} = \frac{r_{PX} + r_{cm}}{2} + 0,049 + j(x_{PX} \frac{x_{PX} + x_{cm}}{2} + 0,0628 \ln \frac{93}{R_p \sqrt{\gamma_3}}), \quad (3.12)$$

где  $r_{cm}$ ,  $x_{cm}$  – активное и индуктивное сопротивление стыка рельса;

$R_p$  – радиус рельса, м;

$\gamma_3$  – проводимость земли, Сим/м.

Полученные сопротивления  $z_{PX}$  должны заменить в матрицах справочное сопротивление  $z_p$ , по которому выполнялся первый расчёт. Затем необходимо выполнить повторный расчёт параметров петли короткого замыкания. Результаты второго расчёта параметров петли короткого замыкания используются при определении места короткого замыкания.

Процедуру замены одних сопротивлений другими можно упростить. Для этого вместо сопротивлений  $z_{PX}$  можно использовать их среднее значение на участке длиной  $l_{KЗ}$ :

$$\tilde{z}_p = \frac{\sum z_{PX}}{l_{KЗ}}, \text{ Ом/км.} \quad (3.13)$$

Сопротивление  $\tilde{z}_p$  должно заменить в матрицах первоначально использованное справочное сопротивление рельсов  $z_p$ . После этого выполняется повторный расчёт. Следует здесь особо отметить, что в этих расчётах расстояние  $l_{KЗ}$  заранее известно поскольку в данной работе расчёты параметров петли короткого замыкания проводятся заранее для создания специальной базы данных. База данных затем будет использована в процедуре определения места КЗ.

В качестве примера реализации внесённых предложений представлены результаты расчета сопротивления одного пути с рельсами Р65 для схемы одностороннего питания однопутного участка длиной 20 км с коротким замыканием на 18, 10 и 2 км, при сопротивлении дуги 0 Ом (таблица 3.5). Диаграмма тока в рельсах при КЗ на 18км приведена на рисунке 3.22.

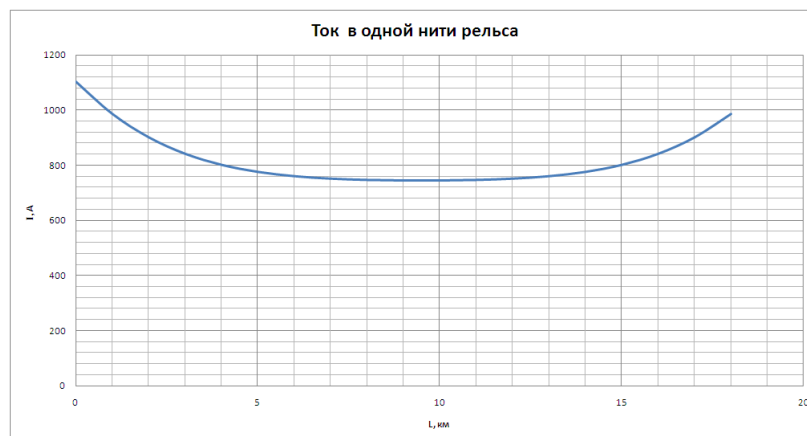


Рисунок 3.22 – Диаграмма изменения тока в одной нити рельса однопутного участка одностороннего питания

Результаты, приведенные в таблице 3.5, показывают, что  $\tilde{z}_p$ , вычисленные при КЗ на 2, 10 и 18км, существенно отличаются друг от друга. Наибольшее влияние на удельное сопротивление рельсов оказывает место КЗ. Это говорит о

том, что использование справочных сопротивлений рельсов  $z_p$ , не учитывающих влияние тока КЗ, может давать существенную погрешность.

Таблица 3.5 – Результаты расчёта сопротивления рельсов

Место КЗ, Км	L, км	$\dot{I}_{PX}$ , А	$H_X$ , А/см	$\mu_X$ , Гн/м	$r_{PX}$ , Ом	$x_{PX}$ , Ом	$z_{PX}$ , Ом	$\tilde{z}_p$ , Ом/км
18	1	1047	15	560	0,31	0,52	0,22+j0,62	0,22+j0,62
	2	936	13	595	0,32	0,53	0,22+j0,62	
	3	855	12	619	0,32	0,54	0,22+j0,62	
	4	799	11	632	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	5	761	11	642	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	6	736	11	654	0,33	0,54	0,22+j0,63	
	7	722	10	661	0,33	0,54	0,22+j0,63	
	8	713	10	664	0,33	0,54	0,22+j0,63	
	9	710	10	666	0,34	0,54	0,22+j0,63	
	10	709	10	667	0,34	0,54	0,22+j0,63	
	11	711	10	665	0,34	0,54	0,22+j0,63	
	12	716	10	663	0,33	0,54	0,22+j0,63	
	13	725	10	660	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	14	741	11	655	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	15	766	11	645	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	16	802	11	635	0,33	0,54	0,22+j0,62	
	17	855	12	620	0,32	0,54	0,22+j0,62	
	18	928	13	600	0,32	0,53	0,22+j0,61	
10	1	1611	23	360	0,25	0,48	0,19+j0,60	0,19+j0,60
	2	1444	21	385	0,26	0,48	0,19+j0,60	
	3	1325	19	425	0,27	0,49	0,19+j0,60	
	4	1247	18	455	0,28	0,50	0,20+j0,60	
	5	1202	17	468	0,28	0,50	0,20+j0,60	
	6	1188	17	475	0,28	0,51	0,20+j0,60	
	7	1200	17	470	0,28	0,50	0,19+j0,60	
	8	1238	18	460	0,28	0,50	0,19+j0,60	
	9	1303	19	430	0,27	0,50	0,18+j0,59	
	10	1398	20	400	0,26	0,49	0,19+j0,59	
2	1	3488	50	230	0,20	0,44	0,16+j0,58	0,16+j0,58
	2	3411	49	250	0,21	0,45	0,15+j0,57	

Для ориентировочной оценки этой погрешности были рассчитаны параметры петель КЗ на 18км при двух значениях рельсов: взятого из справочника  $z_p$  и полученного по приведенной выше методике. Результаты расчётов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Сравнительная оценка параметров петли КЗ при сопротивлениях  $\tilde{z}_p$  и  $z_p$

Наименование параметров петли КЗ	Значения параметров петли КЗ, рассчитанных с использованием $z_p$	Значения параметров петли КЗ, рассчитанных с использованием $\tilde{z}_p$
$r_{кз}$ , Ом	7,55	8,20
$x_{кз}$ , Ом	8,66	8,84
$Z_{кз}$ , Ом	11,49	12,06
$\varphi_{кз}$ , град	48,92	47,16

Данные, приведённые в таблице 3.6, показывают, что погрешности при определении места КЗ по параметрам петли КЗ за счет использования справочного значения  $z_p$ , Ом/км могут достигать: по активной составляющей петли КЗ – 2,5 км или 12,5%; по индуктивной составляющей петли КЗ – 0,5 км или 2,5%; по полному сопротивлению петли КЗ – 1,5 км или 7,5%; по фазовому углу петли КЗ – 3 км или 15%.

В связи с изложенным, предлагается при составлении базы данных кластеров (глава 4), содержащих расчётные параметры петель коротких замыканий, расчёты производить в два этапа. Сначала производить расчёт токов КЗ без учёта влияния его на сопротивление рельсов, а затем по величине тока КЗ уточнять сопротивление рельсов и производить окончательный расчёт параметров петли короткого замыкания. Эти расчёты должны производиться при разных значениях сопротивлений дуги.

### 3.6 Моделирование неоднородности тяговой сети с ЭУП

Рассмотрим схему двустороннего питания двухпутного участка с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП), рисунок (3.23).

В тяговой сети с ЭУП основные неоднородности связаны с повышенным количеством поперечных связей. Усиливающий провод соединён с контактной подвеской через каждые 600-800м. Экранирующий провод заземляется на нулевые точки дроссель трансформаторов на расстоянии не менее 4км.

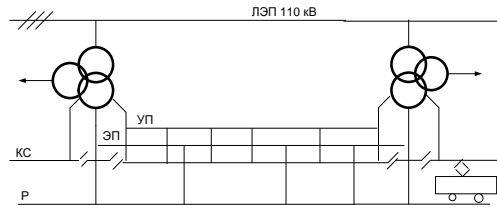


Рисунок 3.23 – Схема тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП)

На рисунке 3.24 представлен фрагмент модели двухпутного участка двустороннего питания с ЭУП.

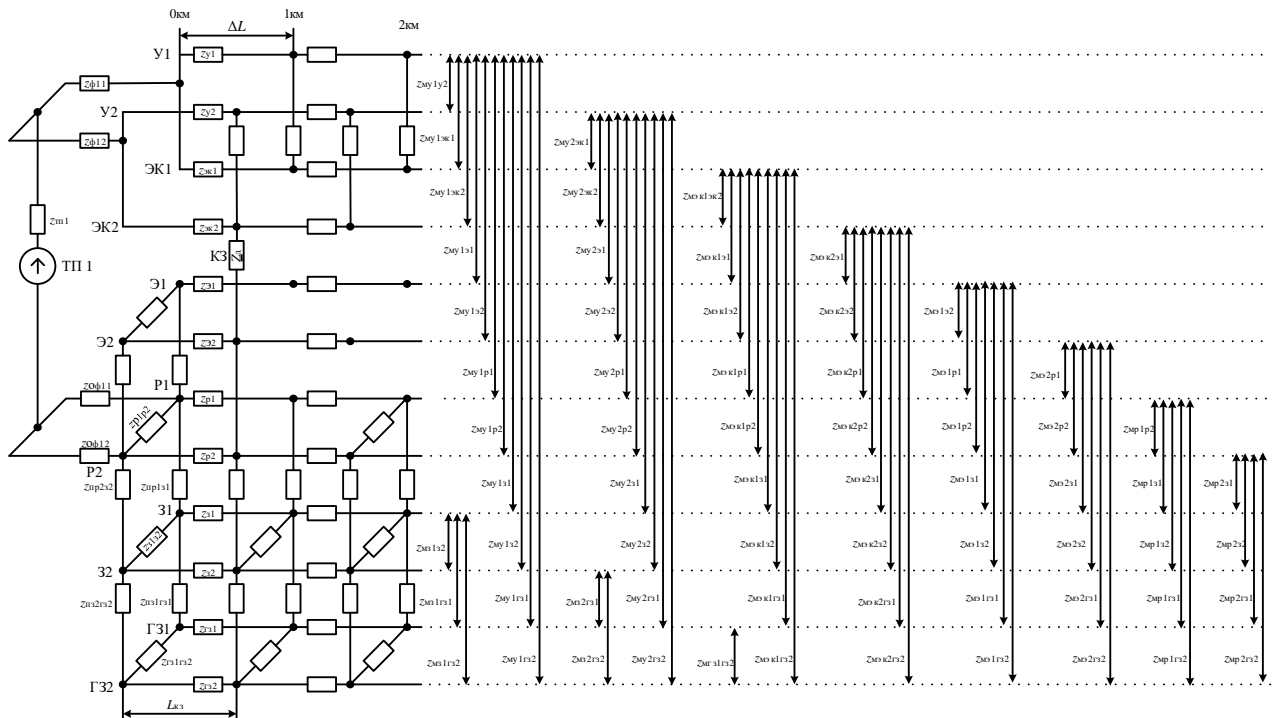


Рисунок 3.24 – Фрагмент модели двухпутного участка двустороннего питания с ЭУП

На рисунке 3.24 введены следующие обозначения:

$\text{Э}1, \text{Э}2$  – экранирующий провод 1-го и 2-го пути;

$\text{У}1, \text{У}2$  – усиливающий провод 1-го и 2-го пути;

$Z_{\text{Э}1}, Z_{\text{Э}2}$  – сопротивление экранирующего провода 1-го и 2-го пути;

$Z_{\text{У}1}, Z_{\text{У}2}$  – сопротивление усиливающего провода 1-го и 2-го пути;

$Z_{\text{МУ}1\text{У}2}$  – сопротивление взаимного влияния между  $\text{У}1$  и  $\text{У}2$ ;

- $Z_{МУ1ЭК1}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и ЭК1;  
 $Z_{МУ1ЭК2}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и ЭК2;  
 $Z_{МУ1Э1}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Э1;  
 $Z_{МУ1Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Э2;  
 $Z_{МУ1Р1}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Р1;  
 $Z_{МУ1Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Р2;  
 $Z_{МУ1З1}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и З1;  
 $Z_{МУ1З2}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и З2;  
 $Z_{МУ1Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Г31;  
 $Z_{МУ1Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между У1 и Г32;  
 $Z_{МУ2ЭК1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и ЭК1;  
 $Z_{МУ2ЭК2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и ЭК2;  
 $Z_{МУ2Э1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Э1;  
 $Z_{МУ2Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Э2;  
 $Z_{МУ2Р1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Р1;  
 $Z_{МУ2Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Р2;  
 $Z_{МУ2З1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и З1;  
 $Z_{МУ2З2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и З2;  
 $Z_{МУ2Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Г31;  
 $Z_{МУ2Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Г32;  
 $Z_{МЭК1ЭК2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и ЭК2;  
 $Z_{МЭК1Э1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Э1;  
 $Z_{МЭК1Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Э2;  
 $Z_{МЭК1Р1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Р1;  
 $Z_{МЭК1Р2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Р2;  
 $Z_{МЭК1З1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и З1;  
 $Z_{МЭК1З2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и З2;

- $Z_{MЭК1Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Г31;  
 $Z_{MЭК1Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК1 и Г32;  
 $Z_{MЭК2Э1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Э1;  
 $Z_{MЭК2Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Э2;  
 $Z_{MЭК2P1}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и P1;  
 $Z_{MЭК2P2}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и P2;  
 $Z_{MЭК231}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и 31;  
 $Z_{MЭК232}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и 32;  
 $Z_{MЭК2Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Г31;  
 $Z_{MЭК2Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между ЭК2 и Г32;  
 $Z_{MЭ1Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и Э2;  
 $Z_{MЭ1P1}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и P1;  
 $Z_{MЭ1P2}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и P2;  
 $Z_{MЭ131}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и 31;  
 $Z_{MЭ132}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и 32;  
 $Z_{MЭ1Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и Г31;  
 $Z_{MЭ1Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между Э1 и Г32;  
 $Z_{MЭ2P1}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и P1;  
 $Z_{MЭ2P2}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и P2;  
 $Z_{MЭ231}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и 31;  
 $Z_{MЭ232}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и 32;  
 $Z_{MЭ2Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и Г31;  
 $Z_{MЭ2Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между Э2 и Г32;  
 $Z_{MУ2ЭК1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и ЭК1;  
 $Z_{MУ2ЭК2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и ЭК2;  
 $Z_{У2Э1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Э1;  
 $Z_{У2Э2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Э2;

- $Z_{Y2P1}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Р1;  
 $Z_{Y2P2}$  – сопротивление взаимного влияния между У2 и Р2;  
 $Z_{MP1P2}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и Р2;  
 $z_{MP131}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и З1;  
 $z_{MP132}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и З2;  
 $z_{MP1Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и ГЗ1;  
 $z_{MP1Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между Р1 и ГЗ2;  
 $z_{MP231}$  – сопротивление взаимного влияния между Р2 и З1;  
 $z_{MP232}$  – сопротивление взаимного влияния между Р2 и З2;  
 $z_{MP2Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между Р2 и ГЗ1;  
 $z_{MP2Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между Р2 и ГЗ2;  
 $z_{M3132}$  – сопротивление взаимного влияния между З1 и З2;  
 $z_{M31Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между З1 и ГЗ1;  
 $z_{M31Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между З1 и ГЗ2;  
 $z_{M32Г31}$  – сопротивление взаимного влияния между З2 и ГЗ1;  
 $z_{M32Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между З2 и ГЗ2;  
 $z_{MГ31Г32}$  – сопротивление взаимного влияния между ГЗ1 и ГЗ2.

На схеме (рисунок 3.24) не показан пост секционирования. Он учтен в модели и располагается на 27 км. Взаимные сопротивления всех элементов тяговой сети показаны стрелками и внесены в соответствующие матричные формы.

На схеме (рисунок 3.24) не показаны поперечные соединения между рельсовыми цепями и экранирующими проводами первого и второго пути. Они также учтены в модели и располагаются через каждые 4 км.

На рассматриваемой модели с ЭУП исследовалось влияние неоднородности тяговой сети в виде поперечных связей контактного и усиливающего проводов, а также экранирующего провода и рельсов на параметры петли КЗ. Результаты зависимостей значения сопротивления петли КЗ от удаленности места КЗ представлены на рисунках 3.25 – 3.28.



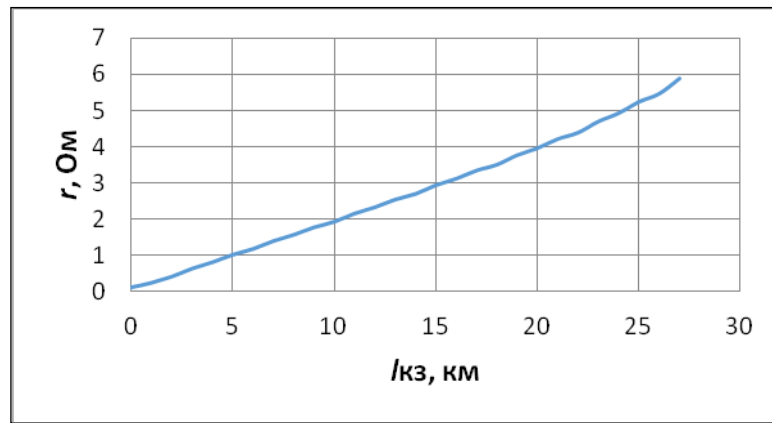


Рисунок 3.25 – Влияние удаленности места КЗ на активную составляющую сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания двухпутного участка с ЭУП

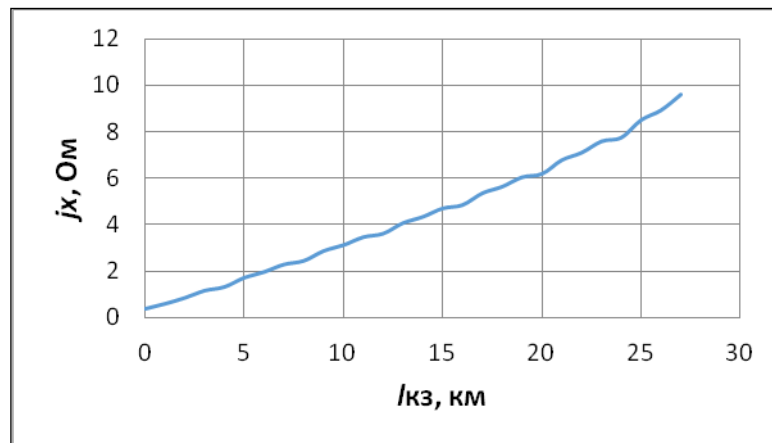


Рисунок 3.26 – Влияние удаленности места КЗ на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания двухпутного участка с ЭУП

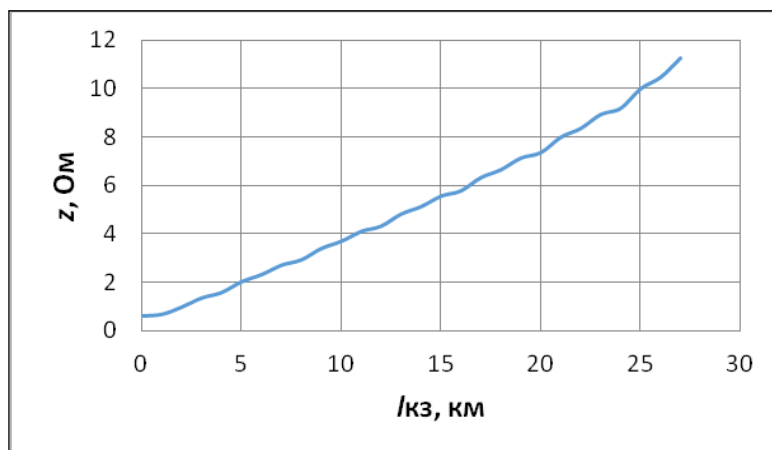


Рисунок 3.27 – Влияние удаленности места КЗ на полное сопротивление петли КЗ при схеме двустороннего питания двухпутного участка с ЭУП

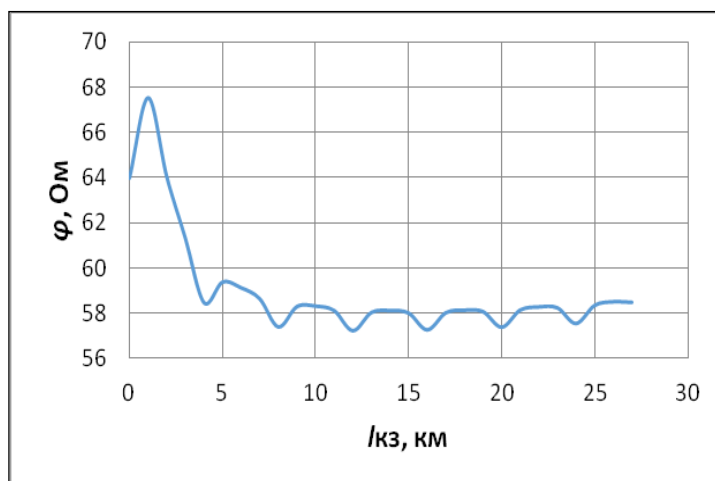


Рисунок 3.28 – Влияние удаленности места КЗ на фазовый угол сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания двухпутного участка с ЭУП

Путем моделирования серии глухих КЗ для схемы ЭУП вычислялись удельные сопротивления тяговой сети. Полученные результаты представлены в приложении П1.29-1.32. Волнистый характер графиков (рисунки 3.25-3.28, приложения П1.29-1.32) объясняется наличием поперечных соединений в рельсовой цепи и поперечными соединениями между усиливающими проводами и контактной сетью.

Наличие всплесков на графиках параметров петли КЗ объясняется поперечными соединениями, которые имеются в схеме с ЭУП. В целом, если сравнивать параметры сопротивлений КЗ двухпутного участка ТС (рисунки 3.15-3.18) и двухпутного участка ТС с ЭУП (рисунок 3.25-3.28), можно увидеть тенденцию уменьшения значения всех параметров петли КЗ ближе к ПС. Это объясняется наличием усиливающих и экранирующих проводов, которые снижают суммарное сопротивление тяговой сети.

### 3.7 Выводы по главе

1. Компьютерное моделирование позволяет получить в объёмном изображении модель сложной тяговой сети с детализацией элементов её структур (контактной сети, рельсовой цепи, балластной призмы и слоёв земли) со свойствами близкими реальному объекту.

2. Математический аппарат, применённый в модели, позволяет рассчитывать схемы электроснабжения разной степени сложности по единому алгоритму.

3. Результаты, полученные на моделях, соответствуют ранее известным теоретическим положениям и экспериментальным данным и открывают дополнительные возможности для дальнейших исследований в области электроснабжения.

4. Анализ параметров короткого замыкания и их производных (активное, индуктивное, полное сопротивление и фазовый угол) показал, что они имеют нелинейный характер, сильно зависят от параметров дуги и могут лишь в комплексе применяться в задачах определения места короткого замыкания.

## **4 Глава – Предлагаемый метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока**

### **4.1 Постановка задачи**

Материал предыдущих глав показывает, что определение места короткого замыкания является многофакторной, многопараметрической задачей, осложнённой тем, что объект исследования, тяговая сеть, рассредоточена, содержит большое количество неоднородных элементов, некоторые элементы сети обладают нелинейными свойствами, случайным характером и оказывают взаимное электромагнитное и физическое влияние. Успешное решение поставленной задачи определения места короткого замыкания должно базироваться на применении современных компьютерных технологий. Предлагаемый ниже метод учитывает в значительной степени перечисленные особенности и соответствует дальнейшему развитию идей, изложенных в работах [46, 65].

### **4.2 Теоретические основы предлагаемого метода**

#### **4.2.1 Математическое обоснование**

Математическая основа метода построена на теории распознавания образов [83, 84].

Необходимость использования этой теории при решении технической задачи определения места короткого замыкания в тяговой сети состоит в следующем. В теории распознавания образов есть понятие сегментирования изображения, т.е. разбиение объекта на ряд признаков (или выделение областей), характеризующих объект. Применительно к рассматриваемой здесь задаче под сегментированием можно считать определение параметров, которые содержит петля короткого замыкания. Другими словами, каждое место короткого замыкания имеет некоторый образ в виде набора (множества) параметров (признаков), характерных для этого места.

Обозначим  $\{X\}$  множество параметров петли короткого замыкания, которые получены техническими средствами в момент КЗ. На рисунке 4.1 они являются элементами вектора  $[V]$ . Множества значений параметров петель коротких замыканий  $\{x_{mji}\}$  получены заранее расчётным путём на множестве заданных элементами вектора-строки  $[L] = [\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_m]$  мест КЗ. Множества  $\{x_{mji}\}$  представлены на рисунке 4.1 подмножествами в виде столбцов матрицы  $[M]$ . Каждый столбец матрицы  $[M]$  соответствует конкретному месту короткого замыкания вектора-строки  $[\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_m]$ .

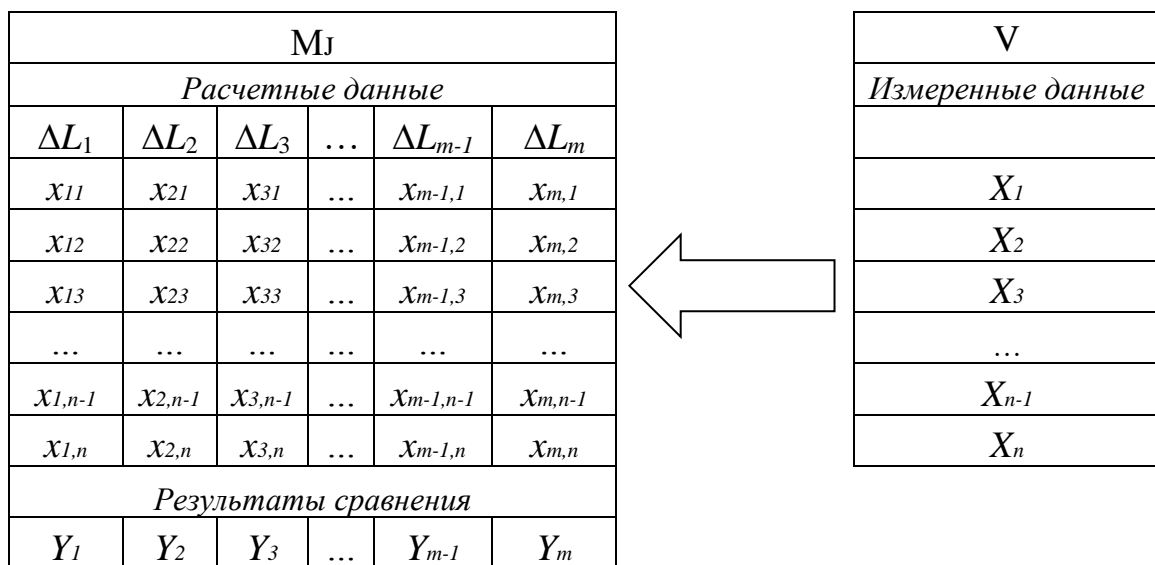


Рисунок 4.1 – Схематическое размещение множеств расчётных и измеренных данных

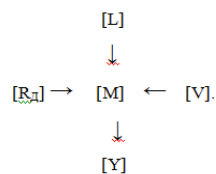
Для определения места короткого замыкания, используя методологию распознавания образов, необходимо идентифицировать  $\{X\}$  и  $\{x\}$ , поскольку каждому столбцу соответствует конкретное место КЗ. Существуют методы идентификации множеств данных. По классификации, приведенной в [83], для данной задачи наиболее подходящим является «Метод сравнения эталонов» (*Template Matching*) [85]. Сущность метода заключается в выделении областей (признаков, параметров) на объектах и последующем сравнении этих областей (признаков, параметров) двух объектов. Каждое совпадение областей увеличивает меру сходства изображений.

При реальном коротком замыкании необходимо измеренное множество параметров  $\{X\}$  сравнить с множеством рассчитанных параметров  $\{x\}$ . Для сравнения эталонов [83] используются простейшие алгоритмы.

При выполнении идентификации образов важным моментом является оценка степени соответствия численных значений измеренных и рассчитанных параметров петель коротких замыканий. Параметры  $\{x\}$  матрицы  $[M_j]$  рассчитываются на границах интервалов  $\Delta L_k = L_k - L_{k-1}$ , на которые условно разделяется тяговая сеть. Элементы  $X$  и  $x$  считаются совпадающими, если  $x_k \geq X \leq x_{k-1}$ . Процедура деления тяговой сети на участки  $\Delta L_k$  рассмотрена ниже в разделе 4.2.2.

Количество совпадений  $[Y]$ , при сравнении рассчитанных элементов  $\{x\}$  с измеренными  $\{X\}$ , суммируется в столбцах матрицы  $[M_j]$  и записывается в нижней строке  $[Y]$  под матрицей  $[M_j]$  (рисунок 4.1). Столбец, в котором  $Y$  имеет наибольшее значение, указывает на место короткого замыкания.

Расчёты параметров  $\{x\}$  в составе матрицы  $[M_j]$  должны производиться при конкретном значении сопротивления дуги  $R_d$ . Поскольку  $R_d$  заранее не известно, предлагается расчёты  $\{x\}$  выполнять для множества значений дуги, заданных с определённым шагом в соответствии с элементами вектора-столбца  $[R_d]$ . Это означает, что количество матриц  $[M_j]$  должно быть равно количеству элементов вектора-столбца  $[R_d]$ . Множество матриц  $[M_j]$  образуют сводную матрицу  $[M]$ . Результаты расчётов  $[M]$  сохраняются в базах данных соединений. Алгоритм определения места КЗ в общем случае будет иметь вид:



Метод определения места повреждения контактной сети, основанный на сравнительном анализе измеренных и рассчитанных параметров петель коротких замыканий, предложено называть метод «С».

### 4.2.2 Порядок формирования матрицы [M]

Технология формирования сводной матрицы [M] показана на примере двухпутного участка, представленного на рисунке (рисунок 4.2).

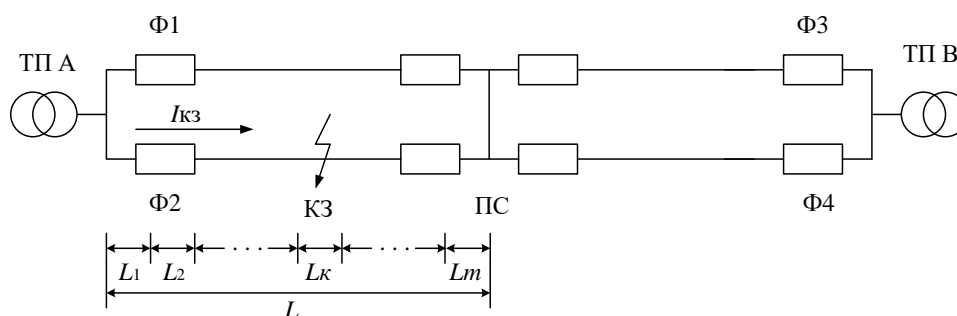


Рисунок 4.2 – Схема двухпутного участка двустороннего питания тяговой сети

Каждый участок тяговой сети  $L$  от подстанции до поста секционирования разбивается на « $m$ » условных участков с номерами №1, №2, ... №  $k$  ... № $m$ .

Протяжённость каждого условного участка определяется разностью  $\Delta L_k = L_k - L_{k-1}$ , где  $L_{k-1}$ ,  $L_k$  – границы участка, представляющие соответственно расстояния от подстанции до начала ( $L_{k-1}$ ) и конца ( $L_k$ )  $k$ -го участка. При этом конец одного участка является началом следующего.

Длина  $k$ -го участка должна быть настолько малой, чтобы погонное сопротивление тяговой сети в пределах данного участка можно было считать одинаковым. Это позволяет лучше учесть неоднородность структуры контактной сети и, в особенности, устройств, расположенных вдоль пути. Удобно принимать длину участка равной длине пикета – 100 м.

На питающем присоединении на границах выделенных участков  $[L_0, L_1, L_2, L_k, \dots, L_m]$  производится расчёт токов короткого замыкания при значениях напряжений на шинах подстанций  $U_p$  и значениях вектора сопротивлений дуги  $[R_d]$ . В результате получают множества расчётных величин токов короткого замыкания  $\{I_p\}$  и фазовых углов  $\{\varphi_p\}$ .

По этим данным, используя известные формулы [40], вычисляют производные параметры петель коротких замыканий:  $R_p$  – активного,  $X_p$  – индуктивного и  $Z_p$  – полного сопротивлений.

Численные значения этих параметров вместе с численными значениями фазового угла  $\varphi_p$  являются элементами векторов-столбцов ( $R_0, X_0, Z_0, \varphi_0$ ) на множестве  $\{x\}$  матрицы  $[M_j]$ . Результаты расчётов производных параметров петли КЗ по каждому питающему присоединению сводятся в сводную матрицу  $[M]$ , которая является основой информационной базы этого присоединения (рисунок 4.3). В сводной матрице  $[M]$  каждому значению дуги  $R_{дл}$  соответствует подматрица  $M_j$ .

Наименование вычисляемых производных параметров	$R_{д},$ Ом	Значения вычисленных параметров петли КЗ на участках разбиения схемы питания					
		№1 [ $L_{0...L_1}$ ]	№2 [ $L_1...L_2$ ]	...	№ $k$ [ $L_{k-1}...L_k$ ]	...	№ $m$ [ $L_{m-1}...L_m$ ]
$R_p, \text{ Ом}$	$R_{д0}$	[ $R_{0,0}; R_{0,1}$ ]	[ $R_{0,1}; R_{0,2}$ ]	...	[ $R_{0,k-1}; R_{0,k}$ ]	...	[ $R_{0,m-1}; R_{0,m}$ ]
$X_p, \text{ Ом}$		[ $X_{0,0}; X_{0,1}$ ]	[ $X_{0,1}; X_{0,2}$ ]	...	[ $X_{0,k-1}; X_{0,k}$ ]	...	[ $X_{0,m-1}; X_{0,m}$ ]
$Z_p, \text{ Ом}$		[ $Z_{0,0}; Z_{0,1}$ ]	[ $Z_{0,1}; Z_{0,2}$ ]	...	[ $Z_{0,k-1}; Z_{0,k}$ ]	...	[ $Z_{0,m-1}; Z_{0,m}$ ]
$\varphi_p, \text{ град}$		[ $\varphi_{0,0}; \varphi_{0,1}$ ]	[ $\varphi_{0,1}; \varphi_{0,2}$ ]	...	[ $\varphi_{0,k-1}; \varphi_{0,k}$ ]	...	[ $\varphi_{0,m-1}; \varphi_{0,m}$ ]
$R_p, \text{ Ом}$	$R_{д1}$	[ $R_{1,0}; R_{1,1}$ ]	[ $R_{1,1}; R_{1,2}$ ]	...	[ $R_{1,k-1}; R_{1,k}$ ]	...	[ $R_{1,m-1}; R_{1,m}$ ]
$X_p, \text{ Ом}$		[ $X_{1,0}; X_{1,1}$ ]	[ $X_{1,1}; X_{1,2}$ ]	...	[ $X_{1,k-1}; X_{1,k}$ ]	...	[ $X_{1,m-1}; X_{1,m}$ ]
$Z_p, \text{ Ом}$		[ $Z_{1,0}; Z_{1,1}$ ]	[ $Z_{1,1}; Z_{1,2}$ ]	...	[ $Z_{1,k-1}; Z_{1,k}$ ]	...	[ $Z_{1,m-1}; Z_{1,m}$ ]
$\varphi_p, \text{ град}$		[ $\varphi_{1,0}; \varphi_{1,1}$ ]	[ $\varphi_{1,1}; \varphi_{1,2}$ ]	...	[ $\varphi_{1,k-1}; \varphi_{1,k}$ ]	...	[ $\varphi_{1,m-1}; \varphi_{1,m}$ ]
$R_p, \text{ Ом}$	$R_{д2}$	[ $R_{2,0}; R_{2,1}$ ]	[ $R_{2,1}; R_{2,2}$ ]	...	[ $R_{2,k-1}; R_{2,k}$ ]	...	[ $R_{2,m-1}; R_{2,m}$ ]
$X_p, \text{ Ом}$		[ $X_{2,0}; X_{2,1}$ ]	[ $X_{2,1}; X_{2,2}$ ]	...	[ $X_{2,k-1}; X_{2,k}$ ]	...	[ $X_{2,m-1}; X_{2,m}$ ]
$Z_p, \text{ Ом}$		[ $Z_{2,0}; Z_{2,1}$ ]	[ $Z_{2,1}; Z_{2,2}$ ]	...	[ $Z_{2,k-1}; Z_{2,k}$ ]	...	[ $Z_{2,m-1}; Z_{2,m}$ ]
$\varphi_p, \text{ град}$		[ $\varphi_{2,0}; \varphi_{2,1}$ ]	[ $\varphi_{2,1}; \varphi_{2,2}$ ]	...	[ $\varphi_{2,k-1}; \varphi_{2,k}$ ]	...	[ $\varphi_{2,m-1}; \varphi_{2,m}$ ]
$R_p, \text{ Ом}$	...	...	...	...	...	...	...
$X_p, \text{ Ом}$		...	...	...	...	...	...
$Z_p, \text{ Ом}$		...	...	...	...	...	...
$\varphi_p, \text{ град}$		...	...	...	...	...	...
$R_p, \text{ Ом}$	$R_{дq}$	[ $R_{q,0}; R_{q,1}$ ]	[ $R_{q,1}; R_{q,2}$ ]	...	[ $R_{q,k-1}; R_{q,k}$ ]	...	[ $R_{q,m-1}; R_{q,m}$ ]
$X_p, \text{ Ом}$		[ $X_{q,0}; X_{q,1}$ ]	[ $X_{q,1}; X_{q,2}$ ]	...	[ $X_{q,k-1}; X_{q,k}$ ]	...	[ $X_{q,m-1}; X_{q,m}$ ]
$Z_p, \text{ Ом}$		[ $Z_{q,0}; Z_{q,1}$ ]	[ $Z_{q,1}; Z_{q,2}$ ]	...	[ $Z_{q,k-1}; Z_{q,k}$ ]	...	[ $Z_{q,m-1}; Z_{q,m}$ ]
$\varphi_p, \text{ град}$		[ $\varphi_{q,0}; \varphi_{q,1}$ ]	[ $\varphi_{q,1}; \varphi_{q,2}$ ]	...	[ $\varphi_{q,k-1}; \varphi_{q,k}$ ]	...	[ $\varphi_{q,m-1}; \varphi_{q,m}$ ]

Рисунок 4.3 – Сводная матрица  $[M]$  значений вычисленных параметров петли КЗ на участках разбиения схемы питания

Количество столбцов матриц соответствует количеству элементов  $m$ -мерного вектора  $[L_0, L_1, L_2, \dots, L_k, \dots, L_m]$ . Дискретность элементов вектора  $[R_{д}]$  влияет на точность определения места КЗ. Изменяя его дискретность, можно свести до минимума фактор случайности переходного сопротивления дуги.



### 4.3 Способ определения места короткого замыкания методом «С»

На рисунке 4.4 представлена структурная схема решения задачи определения места короткого замыкания методом «С».

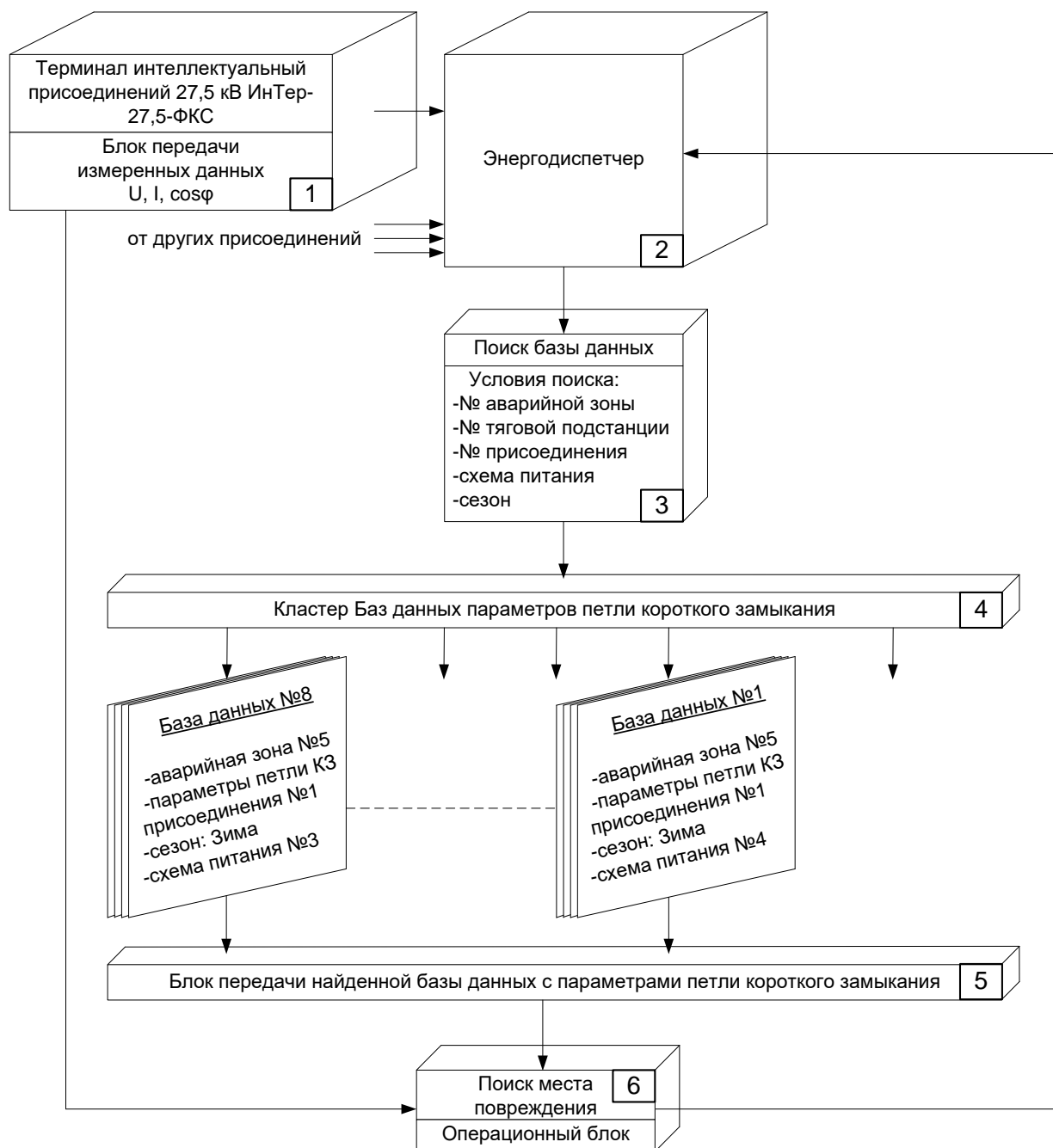


Рисунок 4.4 – Структурная схема определения места короткого замыкания методом «С»

На схеме изображены: рабочее место энергодиспетчера (2), интеллектуальный терминал ИнТер-27,5-ФКС (1), блок передачи данных (1), блок

поиска баз данных (3), кластер баз данных параметров петель коротких замыканий (4), блок передачи конкретной базы данных (5), операционный блок поиска места КЗ (6), который связан с рабочим местом энергодиспетчера.

Существующая система АСУЭ обеспечивает связь рабочего места энергодиспетчера с интеллектуальными терминалами ИнТер-27,5-ФКС тяговых подстанций в пределах одного диспетчерского круга.

На рисунке 4.4 показана связь диспетчера с одной подстанцией. Терминал ИнТер-27,5-ФКС подключается к ЭВМ и АСУ ТП по интерфейсу RS-485 в качестве подсистемы нижнего уровня. Терминал выполняет передачу информации о текущих значениях электрических параметров присоединения контактной сети.

Центральным местом всей схемы, изображённой на рисунке 4.4, является кластер (4), в котором размещены базы данных расчетных параметров петель короткого замыкания.

Каждая такая база содержит информацию по конкретной питающей линии (фидеру): номер аварийной зоны, схему питания, сезон, рассчитанные заранее блоки параметров петель коротких замыканий в заданных точках зоны: сопротивления:  $R_p$ ,  $X_p$ ,  $Z_p$  и фазовый угол  $\varphi_p$ .

В момент реального устойчивого КЗ интеллектуальный терминал ИнТер-27,5-ФКС фиксирует измеренные параметры КЗ  $U_{и}$ ,  $I_{и}$ ,  $\cos\varphi_{и}$  и передаёт их производные сопротивления  $Z_{и}$ ,  $R_{и}$ ,  $X_{и}$  и фазовый угол  $\varphi_{и}$  в операционный блок 6 (рисунок 4.4). Одновременно из терминала ИнТер-27,5-ФКС диспетчеру поступает информация о номерах аварийной тяговой подстанции и аварийной питающей линии (фидера).

Диспетчер, убедившись, что короткое замыкание является устойчивым, вводит в поисковую систему запрос, содержащий номер аварийной зоны, номер аварийного присоединения (фидера), схему питания, погодные условия (сезон).

Поисковая система автоматически выбирает из кластера требуемую базу данных и отправляет ее в операционный блок. В операционном блоке происходит совмещение измеренных параметров петли короткого замыкания с параметрами из базы данных по аварийной зоне (рисунок 4.5).

Наименование вычисляемых производных параметров	$R_d$ , Ом	Значения вычисленных параметров петли КЗ на участках разбиения схемы питания						Производные параметры по результатам измерений
		№1 [ $L_0...L_1$ ]	№2 [ $L_1...L_2$ ]	...	№ $k$ [ $L_{k-1}...L_k$ ]	...	№ $m$ [ $L_{m-1}...L_m$ ]	
$R_p$ , Ом	$R_{D0}$	[ $R_{0,0}; R_{0,1}$ ]	[ $R_{0,1}; R_{0,2}$ ]	...	[ $R_{0,k-1}; R_{0,k}$ ]	...	[ $R_{0,m-1}; R_{0,m}$ ]	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		[ $X_{0,0}; X_{0,1}$ ]	[ $X_{0,1}; X_{0,2}$ ]	...	[ $X_{0,k-1}; X_{0,k}$ ]	...	[ $X_{0,m-1}; X_{0,m}$ ]	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		[ $Z_{0,0}; Z_{0,1}$ ]	[ $Z_{0,1}; Z_{0,2}$ ]	...	[ $Z_{0,k-1}; Z_{0,k}$ ]	...	[ $Z_{0,m-1}; Z_{0,m}$ ]	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		[ $\varphi_{0,0}; \varphi_{0,1}$ ]	[ $\varphi_{0,1}; \varphi_{0,2}$ ]	...	[ $\varphi_{0,k-1}; \varphi_{0,k}$ ]	...	[ $\varphi_{0,m-1}; \varphi_{0,m}$ ]	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	$R_{D1}$	[ $R_{1,0}; R_{1,1}$ ]	[ $R_{1,1}; R_{1,2}$ ]	...	[ $R_{1,k-1}; R_{1,k}$ ]	...	[ $R_{1,m-1}; R_{1,m}$ ]	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		[ $X_{1,0}; X_{1,1}$ ]	[ $X_{1,1}; X_{1,2}$ ]	...	[ $X_{1,k-1}; X_{1,k}$ ]	...	[ $X_{1,m-1}; X_{1,m}$ ]	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		[ $Z_{1,0}; Z_{1,1}$ ]	[ $Z_{1,1}; Z_{1,2}$ ]	...	[ $Z_{1,k-1}; Z_{1,k}$ ]	...	[ $Z_{1,m-1}; Z_{1,m}$ ]	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		[ $\varphi_{1,0}; \varphi_{1,1}$ ]	[ $\varphi_{1,1}; \varphi_{1,2}$ ]	...	[ $\varphi_{1,k-1}; \varphi_{1,k}$ ]	...	[ $\varphi_{1,m-1}; \varphi_{1,m}$ ]	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	$R_{D2}$	[ $R_{2,0}; R_{2,1}$ ]	[ $R_{2,1}; R_{2,2}$ ]	...	[ $R_{2,k-1}; R_{2,k}$ ]	...	[ $R_{2,m-1}; R_{2,m}$ ]	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		[ $X_{2,0}; X_{2,1}$ ]	[ $X_{2,1}; X_{2,2}$ ]	...	[ $X_{2,k-1}; X_{2,k}$ ]	...	[ $X_{2,m-1}; X_{2,m}$ ]	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		[ $Z_{2,0}; Z_{2,1}$ ]	[ $Z_{2,1}; Z_{2,2}$ ]	...	[ $Z_{2,k-1}; Z_{2,k}$ ]	...	[ $Z_{2,m-1}; Z_{2,m}$ ]	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		[ $\varphi_{2,0}; \varphi_{2,1}$ ]	[ $\varphi_{2,1}; \varphi_{2,2}$ ]	...	[ $\varphi_{2,k-1}; \varphi_{2,k}$ ]	...	[ $\varphi_{2,m-1}; \varphi_{2,m}$ ]	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	...	...	...	...	...	...	...	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		...	...	...	...	...	...	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		...	...	...	...	...	...	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		...	...	...	...	...	...	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	$R_{Dq}$	[ $R_{q,0}; R_{q,1}$ ]	[ $R_{q,1}; R_{q,2}$ ]	...	[ $R_{q,k-1}; R_{q,k}$ ]	...	[ $R_{q,m-1}; R_{q,m}$ ]	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		[ $X_{q,0}; X_{q,1}$ ]	[ $X_{q,1}; X_{q,2}$ ]	...	[ $X_{q,k-1}; X_{q,k}$ ]	...	[ $X_{q,m-1}; X_{q,m}$ ]	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		[ $Z_{q,0}; Z_{q,1}$ ]	[ $Z_{q,1}; Z_{q,2}$ ]	...	[ $Z_{q,k-1}; Z_{q,k}$ ]	...	[ $Z_{q,m-1}; Z_{q,m}$ ]	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		[ $\varphi_{q,0}; \varphi_{q,1}$ ]	[ $\varphi_{q,1}; \varphi_{q,2}$ ]	...	[ $\varphi_{q,k-1}; \varphi_{q,k}$ ]	...	[ $\varphi_{q,m-1}; \varphi_{q,m}$ ]	$\varphi_{и}$ , град
$\Sigma$		1	1	...	4	...	3	

Рисунок 4.5 – Матрица [M] с совмещёнными расчётными и измеренными параметрами петель КЗ

Определение места короткого замыкания в операционном блоке сводится к процедуре сравнения значений измеренных элементов множеств  $\{R_{и}, X_{и}, Z_{и}, \varphi_{и}\}$  со значениями множеств  $\{R_0, X_0, Z_0, \varphi_0\}$  на участках  $[\Delta L_k]$ , из которых состоит матрица рассчитанных производных параметров короткого замыкания (рисунок 4.5). При каждом сравнении производится суммирование количества попаданий значений элементов множеств  $\{R_{и}, X_{и}, Z_{и}, \varphi_{и}\}$  в интервалы значений множества  $\{R_0, X_0, Z_0, \varphi_0\}$  в границах участков  $L_{k+1}...L_k$  при определенном значении дуги  $R_d$ . Участок  $\Delta L_k$  с наибольшей суммой попаданий разноимённых элементов в область с определенным значением дуги  $R_d$  соответствует месту КЗ.

В матрице на рисунке 4.5 это интервал  $\Delta L_k$  при значении дуги  $R_{д2}$  с наибольшим числом попавших разноименных элементов 4.

Общее число попаданий больше на интервале  $\Delta L_m$  равно 5. Однако, на этом интервале два из них относятся к значению дуги  $R_{до}$ , а три к дуге  $R_{д1}$ . По этой причине на интервале  $\Delta L_m$  в целом засчитывается сумма попаданий лишь 3 при значении  $R_{д1}$ . Информация о месте КЗ передается автоматически из операционного блока энергодиспетчеру (рисунок 4.4). На способ определения места короткого замыкания получен патент на изобретение.

#### **4.4 Оценка погрешности предлагаемого метода «С»**

Для оценки достоверности результатов определения места короткого замыкания методом «С» необходимо сравнение его результатов с имеющимися экспериментальными данными параметров короткого замыкания, которые были получены на действующем участке. Эксперимент проводился с целью получения фактических данных параметров петли короткого замыкания через дугу при заданном месте короткого замыкания.

##### **4.4.1 Характеристика участка, на котором проводился эксперимент**

Для исследований был выбран двухпутный участок СКЖД Погорелово – Старая Станица – Сысоево, оборудованный системами регистрации и сбора данных (рисунок 4.6).

Тяговые подстанции Погорелово и Сысоево являются опорными. Между ними расположены промежуточная отпаечная подстанция Старая Станица и районная подстанция Промзона. Зона, на которой проводилось короткое замыкание, получает питание от подстанций Погорелово и Старая Станица.

Расстояния между подстанциями:

Погорелово - Старая Станица – 44,7 км;

Старая Станица - Промзона – 34,75 км;

Промзона - Сысоево – 27 км.

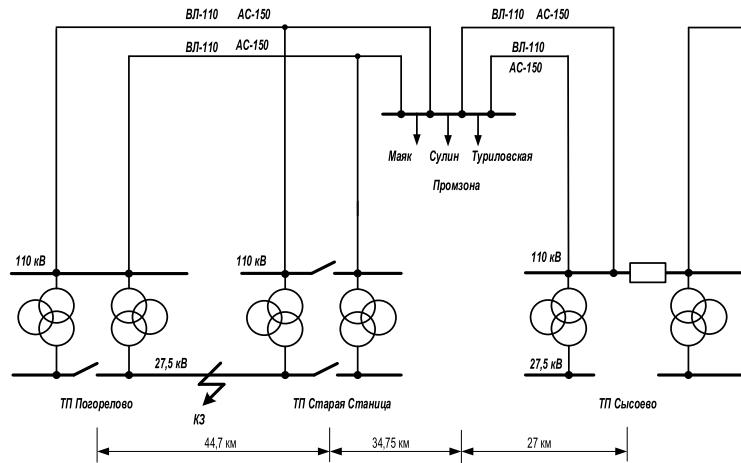


Рисунок 4.6 – Схема электроснабжения участка СКЖД Погорелово – Сысоево

Серия коротких замыканий была проведена в конце апреля 2011г на межподстанционной зоне Погорелово – Старая Станица (рисунок 4.7)

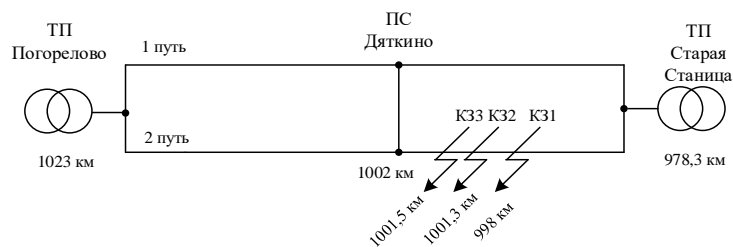


Рисунок 4.7 – Места проведения коротких замыканий на межподстанционной зоне Старая Станица – Погорелово

Предполагалось, что этот участок явится полигоном для разработки и корректировки метода «С».

Тяговая подстанция Старая Станица расположена на 978,3км, подстанция Погорелово – на 1023 км, пост секционирования Дяткино – на 1002 км.

На тяговой подстанции Старая Станица установлен трансформатор ТДТНГ-20000/110, на тяговой подстанции Погорелово – трансформатор ТДТНГЭ-31500/110. Контактная сеть на в чётном и нечётном направлениях – ПБСМ-70+МФ-100, высота контактного провода над уровнем рельсов 6,55 м, рельсы Р65, расстояние между путями 4,1 м.

Короткие замыкания производились на перегоне Тарасовка – Глубокая на фиксаторах опор: № 242 (998км) – первое КЗ; № 352 (1001 км 3 ПК) – второе КЗ; № 360 (1001 км 5 ПК) – третье КЗ.

Сезон проведения эксперимента: конец весны,  $t=15^{\circ}\text{C}$ , пасмурно, без осадков. Измерение параметров дуги КЗ выполнялось средствами СДПП.

Данные эксперимента использовались в качестве эталона в процессе работы над методом определения места КЗ.

Условия и порядок проведения эксперимента и результаты диагностики СДПП подробно представлены в Приложениях П2 и П3.1 – П3.3

#### **4.4.2 Характеристика и учёт параметров системы внешнего электроснабжения участка Старая Станица – Сысоево**

Определение места короткого замыкания является оперативной задачей, требующей ускоренного принятия решений энергодиспетчером в аварийной ситуации. Рассмотренный выше метод детализированного компьютерного моделирования схем электроснабжения при расчёте токов КЗ, учитывающий неоднородности схем тягового электроснабжения, позволяет уточнить, а значит и ускорить определение места повреждения.

В исследованиях [95,96,97,98,99,100] показано, что конфигурация и параметры схемы внешнего электроснабжения также оказывают влияние на параметры короткого замыкания в тяговой сети.

В данном разделе при расчёте параметров короткого замыкания на участке Старая Станица – Сысоево, использовались рекомендации, приведенные в перечисленных выше работах. Исследовалась также погрешность при определении места короткого замыкания, если не учитывать неоднородность системы внешнего электроснабжения.

Тяговые подстанции на участке Старая Станица – Сысоево, как показано на схеме рисунка 4.6, связаны между собой ВЛ-110 кВ с проводами марки АС-150.

На рисунке 4.8 представлена схема замещения электроснабжения этого участка.

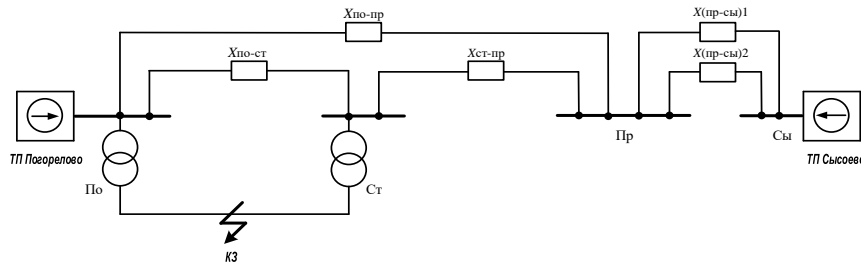


Рисунок 4.8 – Схема замещения электроснабжения участка Погорелово – Старая Станица – Сысоево

На схеме приняты следующие условные сокращения подстанций: Погорелово – По; Старая Станица – Ст; Промзона – Пр; Сысоево – Сы.

При погонном индуктивном сопротивлении проводов АС-150  $x=j0,38$  Ом/км получены следующие сопротивления участков ВЛ:

$$X_{\text{по-пр}} = 0,38 \cdot (44,7 + 34,75) = 30,19 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{по-ст}} = 0,38 \cdot 44,7 = 16,99 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ст-пр}} = 0,38 \cdot 34,75 = 13,21 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{кз(пр-сы)1}} = 0,38 \cdot 27,0 = 10,26 \text{ Ом} = X_{\text{кз(пр-сы)2}}.$$

Подстанции Погорелово, Старая Станица и Промзона соединены в треугольник (рисунок 4.9).

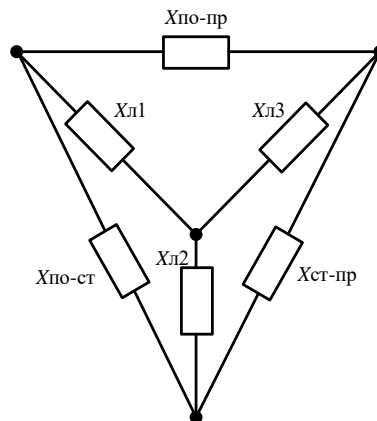


Рисунок 4.9 – Схема замещения сопротивлений ВЛ

Преобразуем треугольник сопротивлений в звезду с сопротивлениями:

$$X_{\text{л1}} = \frac{X_{\text{по-пр}} \cdot X_{\text{по-ст}}}{X_{\text{по-пр}} + X_{\text{по-ст}} + X_{\text{ст-пр}}} = 8,62 \text{ Ом};$$

$$X_{л2} = \frac{X_{\text{по-ст}} \cdot X_{\text{ст-пр}}}{X_{\text{по-пр}} + X_{\text{по-ст}} + X_{\text{ст-пр}}} = 3,73 \text{ Ом};$$

$$X_{л3} = \frac{X_{\text{по-пр}} \cdot X_{\text{ст-пр}}}{X_{\text{по-пр}} + X_{\text{по-ст}} + X_{\text{ст-пр}}} = 60,70 \text{ Ом}.$$

Подстанция Промзона связана с опорной подстанцией Сысоево параллельно соединёнными сопротивлениями  $X_{(\text{пп-сы})1}$  и  $X_{(\text{пп-сы})2}$ , которые заменим эквивалентным сопротивлением:

$$X_{(\text{пп-сы})1,2} = 0,5 \cdot 10,48 = 5,24 \text{ Ом}.$$

Заменим сопротивления  $Z_{л3}$  и  $Z_{(\text{пп-сы})1,2}$  их суммой:

$$X_{л4} = X_{л3} + X_{(\text{пп-сы})1,2} = 60,70 + 5,24 = 65,94 \text{ Ом}.$$

В результате вместо схемы замещения, представленной на рисунке 4.8, получим схему замещения (рисунок 4.10):

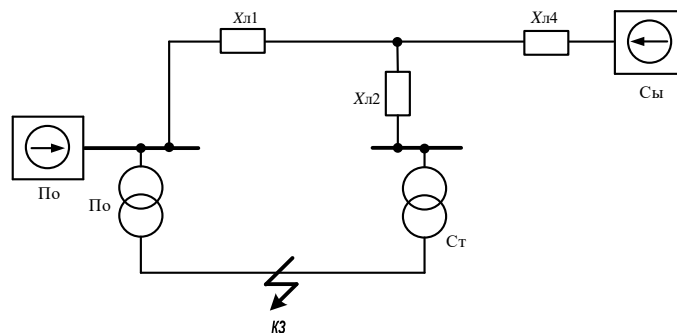


Рисунок 4.10 – Преобразованная схема замещения Погорелово – Старая Станица – Сысоево

Сопротивления внешней схемы электроснабжения (рисунок 4.10) приведём к сопротивлению 27,5 кВ по формуле:

$$X'_c = X \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{ср.л}}^2},$$

где  $X_{\text{ср.л}} = 115 \text{ кВ}$  – среднее номинальное линейное напряжение внешней системы электроснабжения;

$X$  – индуктивное сопротивление соответствующего участка схемы;

$U_{\text{ср.ном}} = 27,5 \text{ кВ}$  – среднее номинальное линейное напряжение тяговой сети.



$$X'_{c1} = X_{л1} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{ср.Н}}^2} = 8,62 \cdot \frac{27,5^2}{115^2} = 0,49 \text{ Ом};$$

$$X'_{c2} = X_{л2} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{ср.Н}}^2} = 3,73 \cdot \frac{27,5^2}{115^2} = 0,21 \text{ Ом};$$

$$X'_{c4} = X_{л4} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{ср.Н}}^2} = 65,94 \cdot \frac{27,5^2}{115^2} = 3,76 \text{ Ом}.$$

Схема замещения, составленная с учетом приведенных сопротивлений, представлена на рисунке 4.11:

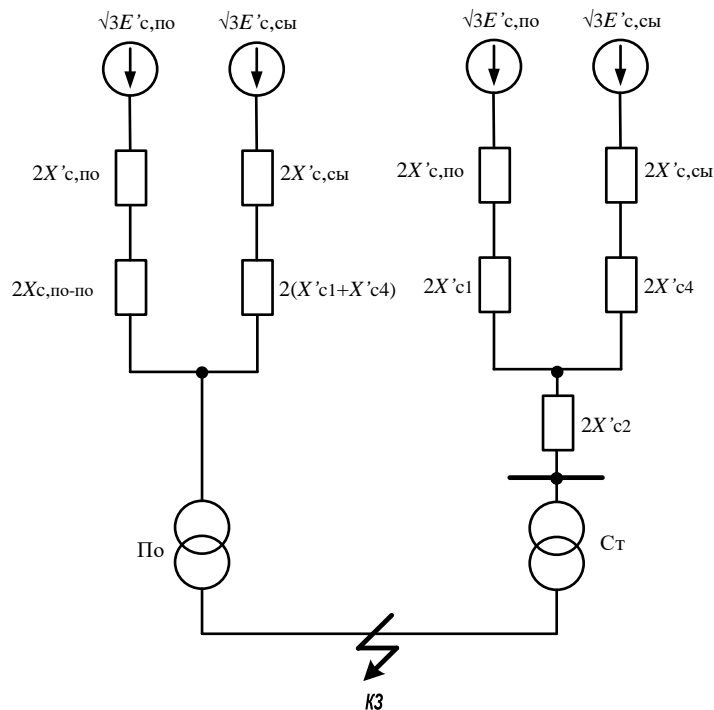


Рисунок 4.11 – Схема замещения с учетом приведенных сопротивлений

На схеме рисунка 4.11 приведены обозначения:

$E'_{с,по} \sqrt{3}, E'_{с,сы} \sqrt{3}$  – линейные напряжения опорных подстанций Погорелово и Сысоево;

$X'_{с,по}$  и  $X'_{с,сы}$  – внутренние приведенные сопротивления тяговых подстанций Погорелово и Сысоево.

Учитывая, что подстанции Погорелово и Сысоево являются опорными, примем их сопротивления равным нулю, т.е.  $X'_{с,по} = X'_{с,сы} = 0$ . Тяговая часть

подстанции Погорелово питается непосредственно от шин 110 кВ опорной подстанции этой же подстанции, поэтому примем сопротивление питающей линии  $X'_{c,по-по} = 0$ .

Сопротивление  $X'_{c,по} + X'_{c,по-по} = 0$ , расположено параллельно ветви, соединяющей тяговую подстанцию Погорелово с подстанцией Сысоево, поэтому сопротивление эквивалентной линии со стороны подстанции Сысоево  $X'_{c,сы} + X'_{c,1} + X'_{c,4}$  можно не учитывать.

Параллельные ветви, питающие подстанцию Старая Станица подстанциями Погорелово и Сысоево (рисунок 4.9), заменим эквивалентным приведенным сопротивлением

$$X'_{c,4} = \frac{X'_{c,1} \cdot X'_{c,4}}{X'_{c,1} + X'_{c,4}} = \frac{0,49 \cdot 3,76}{0,49 + 3,76} = 0,43 \text{ Ом.}$$

Последовательно соединенные сопротивления  $X'_{c1,4}$  и  $X'_{c2}$  заменим суммарным сопротивлением

$$X'_{c1,4,2} = X'_{c1,4} + X'_{c2} = 0,43 + 0,21 = 0,64 \text{ Ом.}$$

На рисунке 4.12 представлена схема замещения внешней системы электроснабжения, в которой учтены перечисленные выше эквивалентные замены и упрощения.

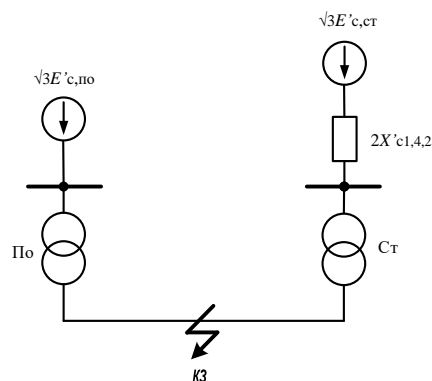


Рисунок 4.12 – Окончательная схема замещения внешней системы электроснабжения подстанций Погорелово – Старая Станица

Расчетная схема, учитывающая индуктивные сопротивления внешней системы и сопротивления понижающих трансформаторов, имеет вид,

представленный на рис. 4.13.

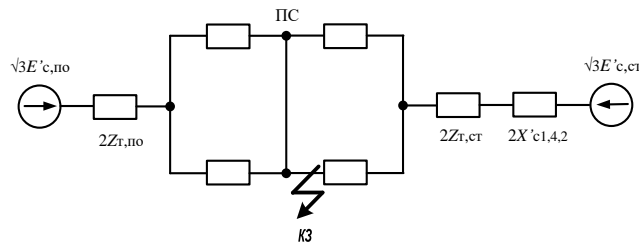


Рисунок 4.13 – Расчетная схема Погорелово – Старая Станица

Сопротивления трансформаторов тяговых подстанций Погорелово и Старая Станица представлены на рисунке 4.13 сопротивлениями  $Z_{т,по}$  и  $Z_{т,ст}$ .

Численные значения этих сопротивлений:

$$Z_{т,по} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5 \cdot 27500^2}{100 \cdot 31,5 \cdot 10^6} = 2,52 \text{ Ом};$$

$$Z_{т,ст} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5 \cdot 27500^2}{100 \cdot 20 \cdot 10^6} = 3,97 \text{ Ом}.$$

В итоге сопротивления подстанций Погорелово и Старая Станица будут:

$$\text{Погорелово } Z_{по} = 2Z_{т,по} = 2 \cdot 2,52 = 5,04 \text{ Ом};$$

$$\text{Старая Станица } Z_{ст} = 2X'_{c1,4,2} + 2Z_{т,ст} = 2 \cdot 0,64 + 2 \cdot 3,97 = 9,22 \text{ Ом}.$$

#### 4.4.3 Расчёт параметров короткого замыкания

По технологии, описанной в разделе 4.2.2, на компьютерной модели был выполнен расчёт параметров короткого замыкания участка, на котором производился эксперимент. Эта технология, как было показано в разделе 4.2.2, предполагает заполнение матрицы  $[M]$  по результатам расчётов параметров короткого замыкания. При составлении модели использованы параметры трансформаторов подстанций и контактной сети межподстанционной зоны Старая Станица – Погорелово, параметры переходного сопротивления рельсы-земля, выбранные в соответствии с сезоном. Контактная сеть и рельсовая цепь представлены самостоятельными элементами на каждом пути. Было учтено, что балластная призма опирается на глубокую землю (глава 3, модель № 6).

Расчёты параметров проводились при параметрах дуги в предполагаемом диапазоне 0 – 10 Ом с шагом 0,1 Ом. Фрагменты расчетной матрицы базы данных, совмещённые с измеренными параметрами при трёх коротких замыканиях, представлены на рисунках 4.14, 4.15, 4.16.

Следует отметить, что на рисунках 4.14, 4.15, 4.16 формат данных лишь внешне отличается от соответствующей формы на рисунке 4.5. Практика расчётов показала, что границы интервалов разбиения участка  $\Delta L_k$  не следует размещать в каждом столбце матрицы [M], но удобнее считать границами интервалов смежные столбцы матрицы [M] (рисунок 4.14-4.16). При таком подходе сокращается объём вводимой информации.

#### 4.4.4 Определение места короткого замыкания по результатам первого эксперимента на 998км на опоре № 242

На рисунке 4.14 приведён фрагмент матрицы, в которой совмещены рассчитанные и измеренные параметры петли КЗ в диапазоне сопротивлений дуги (вторая колонка слева).

Параметры петли КЗ	Дуга, Ом	Расчитанные данные													Изм. данные
		997	997,1	997,2	997,3	997,4	997,5	997,6	997,7	997,8	997,9	998	998,1	998,2	
r	2,6	13,17	13,26	13,36	13,45	13,54	13,64	13,73	13,83	13,92	14,01	14,10	14,19	14,37	14,70
x		11,66	11,76	11,85	11,94	12,03	12,12	12,21	12,31	12,40	12,47	12,53	12,60	12,65	12,18
Z		17,59	17,72	17,85	17,98	18,12	18,25	18,38	18,51	18,64	18,75	18,87	18,98	19,15	19,09
Φ		41,53	41,55	41,57	41,59	41,61	41,63	41,65	41,67	41,69	41,66	41,63	41,60	41,37	39,64
r	2,7	13,47	13,57	13,67	13,76	13,86	13,95	14,05	14,15	14,24	14,34	14,43	14,52	14,65	14,70
x		11,68	11,77	11,86	11,95	12,04	12,13	12,23	12,32	12,41	12,48	12,54	12,61	12,66	12,18
Z		17,83	17,96	18,09	18,23	18,36	18,49	18,62	18,76	18,89	19,00	19,12	19,23	19,36	19,09
Φ		40,91	40,93	40,95	40,97	40,99	41,01	41,03	41,05	41,07	41,04	41,01	40,97	40,83	39,64
r	2,8	13,78	13,88	13,97	14,07	14,17	14,27	14,37	14,47	14,56	14,66	14,76	14,85	14,93	14,70
x		11,69	11,78	11,87	11,96	12,05	12,15	12,24	12,33	12,42	12,49	12,56	12,62	12,66	12,18
Z		18,07	18,20	18,34	18,47	18,60	18,74	18,87	19,01	19,14	19,26	19,38	19,49	19,58	19,09
Φ		40,30	40,32	40,34	40,36	40,38	40,40	40,42	40,44	40,46	40,43	40,40	40,36	40,29	39,64
r	2,9	14,08	14,18	14,28	14,38	14,49	14,59	14,69	14,79	14,89	14,99	15,09	15,18	15,22	14,70
x		11,70	11,79	11,88	11,97	12,07	12,16	12,25	12,34	12,43	12,50	12,57	12,64	12,66	12,18
Z		18,31	18,44	18,58	18,72	18,85	18,99	19,12	19,26	19,40	19,52	19,63	19,75	19,80	19,09
Φ		39,71	39,73	39,75	39,77	39,79	39,81	39,83	39,85	39,87	39,84	39,80	39,77	39,77	39,64
r	3	14,39	14,49	14,59	14,70	14,80	14,90	15,00	15,11	15,21	15,31	15,41	15,51	15,50	14,70
x		11,71	11,80	11,89	11,99	12,08	12,17	12,26	12,35	12,45	12,51	12,58	12,65	12,67	12,18
Z		18,55	18,69	18,83	18,96	19,10	19,24	19,38	19,52	19,65	19,77	19,90	20,02	20,02	19,09
Φ		39,14	39,16	39,18	39,20	39,21	39,23	39,25	39,27	39,29	39,26	39,22	39,19	39,26	39,64
r	3,1	14,69	14,80	14,90	15,01	15,11	15,22	15,32	15,43	15,53	15,64	15,74	15,85	15,78	14,70
x		11,72	11,81	11,90	12,00	12,09	12,18	12,27	12,37	12,46	12,52	12,59	12,66	12,67	12,18
Z		18,79	18,93	19,07	19,21	19,35	19,49	19,63	19,77	19,91	20,03	20,16	20,28	20,24	19,09
Φ		38,58	38,60	38,62	38,63	38,65	38,67	38,69	38,71	38,73	38,69	38,66	38,63	38,76	39,64
r	3,2	15,00	15,10	15,21	15,32	15,43	15,53	15,64	15,75	15,86	15,96	16,07	16,18	16,06	14,70
x		11,73	11,82	11,92	12,01	12,10	12,19	12,28	12,38	12,47	12,54	12,60	12,67	12,68	12,18
Z		19,04	19,18	19,32	19,46	19,61	19,75	19,89	20,03	20,17	20,30	20,42	20,55	20,46	19,09
Φ		38,03	38,05	38,07	38,09	38,11	38,13	38,14	38,16	38,18	38,15	38,11	38,08	38,28	39,64
Σ		1	1	1	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1	

Рисунок 4.14 – Фрагмент матрицы [M] с результатом определения места КЗ по параметрам первого эксперимента

В верхней строке матрицы [M] (рисунок 4.14) приведены координаты отрезков пути с шагом 0,1км, на которые разделена тяговая сеть. В крайнем левом столбце матрицы размещены наименования рассчитанных параметров петли КЗ  $R$ ,  $X$ ,  $Z$ ,  $\varphi$ . Каждому такому параметру соответствуют численные значения в горизонтальной строке. Во втором столбце матрицы размещен вектор-столбец  $[R_d]$ , содержащий возможные параметры дуги с шагом 0,1 Ом. В крайнем правом столбце размещены численные значения измеренных параметров петли КЗ, представляющие вектор-столбец,

$R_{и}$	14,70
$X_{и}$	12,18
$Z_{и}$	19,09
$\varphi_{и}$	39,64

которые повторены в соответствии с количеством заданных численных значений параметров дуги. Затенённые элементы строк соответствуют совпадению измеренных и рассчитанных параметров петли КЗ. В нижней строке матрицы показаны суммарные количества совпадений по каждому столбцу. Наибольшее количество совпадений (3) приходится на столбец с местом КЗ на 997,6 км. В этом столбце при сопротивлении дуги 2.9 Ом сошлись в одном месте, обведенном рамкой на рисунке 4.14, значения всех параметров петли КЗ. В действительности КЗ проводилось на 998км, т.е. расчётное место КЗ отличается от реального на 400м.

#### 4.4.5 Определение места короткого замыкания по результатам второго эксперимента на 1001,3 км на опоре №352

Аналогично предыдущему случаю на рисунке 4.15 приведён фрагмент матрицы, в которой совмещены рассчитанные и измеренные параметры петли КЗ при втором КЗ. Численные значения измеренных параметров петли при втором КЗ, представлены в векторе-столбце

$R_{и}$	18,94
$X_{и}$	15,27
$Z_{и}$	24,33
$\varphi_{и}$	38,88

и размещены в крайнем правом столбце фрагмента матрицы (рисунок 4.15), причём вектор-столбец повторен при каждом значении сопротивления дуги.

Параметры петли КЗ	Дуга, Ом	Расчитанные данные																Изм. данные
		1000,1	1000,2	1000,3	1000,4	1000,5	1000,6	1000,7	1000,8	1000,9	1001	1001,1	1001,2	1001,3	1001,4	1001,5	1001,6	
2,5	r	15,88	16,00	16,12	16,24	16,35	16,47	16,59	16,71	16,82	16,98	17,14	17,30	17,46	17,61	17,77	17,93	18,94
	x	14,31	14,40	14,48	14,56	14,64	14,73	14,81	14,89	14,98	15,11	15,25	15,39	15,52	15,66	15,80	15,94	15,27
	Z	21,38	21,52	21,67	21,81	21,95	22,10	22,24	22,38	22,52	22,73	22,94	23,15	23,36	23,57	23,78	23,99	24,33
	Ф	42,03	41,98	41,94	41,90	41,85	41,81	41,76	41,72	41,67	41,67	41,66	41,66	41,65	41,64	41,64	41,63	38,88
2,6	r	16,27	16,39	16,51	16,63	16,76	16,88	17,00	17,12	17,24	17,40	17,57	17,73	17,89	18,05	18,21	18,38	18,94
	x	14,33	14,41	14,49	14,58	14,66	14,74	14,82	14,91	14,99	15,13	15,26	15,40	15,54	15,68	15,81	15,95	15,27
	Z	21,68	21,82	21,97	22,12	22,26	22,41	22,55	22,70	22,85	23,06	23,27	23,48	23,70	23,91	24,12	24,33	24,33
	Ф	41,37	41,33	41,28	41,23	41,19	41,14	41,10	41,05	41,01	41,00	40,99	40,99	40,98	40,97	40,97	40,96	38,88
2,7	r	16,66	16,78	16,91	17,03	17,16	17,28	17,41	17,53	17,66	17,82	17,99	18,16	18,32	18,49	18,66	18,82	18,94
	x	14,34	14,42	14,51	14,59	14,67	14,76	14,84	14,92	15,00	15,14	15,28	15,42	15,55	15,69	15,83	15,97	15,27
	Z	21,98	22,13	22,28	22,43	22,58	22,72	22,87	23,02	23,17	23,39	23,60	23,82	24,04	24,25	24,47	24,68	24,33
	Ф	40,73	40,68	40,64	40,59	40,54	40,50	40,45	40,40	40,36	40,35	40,34	40,33	40,33	40,32	40,31	40,31	38,88
2,8	r	17,04	17,17	17,30	17,43	17,56	17,69	17,82	17,95	18,07	18,24	18,42	18,59	18,76	18,93	19,10	19,27	18,94
	x	14,35	14,44	14,52	14,60	14,69	14,77	14,85	14,94	15,02	15,16	15,29	15,43	15,57	15,71	15,84	15,98	15,27
	Z	22,28	22,44	22,59	22,74	22,89	23,04	23,20	23,35	23,50	23,72	23,94	24,16	24,38	24,60	24,82	25,04	24,33
	Ф	40,11	40,06	40,01	39,96	39,92	39,87	39,82	39,77	39,73	39,72	39,71	39,70	39,69	39,69	39,68	39,67	38,88
2,9	r	17,43	17,56	17,70	17,83	17,96	18,09	18,23	18,36	18,49	18,67	18,84	19,02	19,19	19,37	19,54	19,72	18,94
	x	14,37	14,45	14,53	14,62	14,70	14,78	14,87	14,95	15,03	15,17	15,31	15,45	15,58	15,72	15,86	16,00	15,27
	Z	22,59	22,74	22,90	23,05	23,21	23,37	23,52	23,68	23,83	24,05	24,28	24,50	24,72	24,95	25,17	25,39	24,33
	Ф	39,50	39,45	39,40	39,36	39,31	39,26	39,21	39,16	39,11	39,10	39,10	39,09	39,08	39,07	39,06	39,05	38,88
3	r	18,21	18,35	18,49	18,62	18,76	18,90	19,04	19,18	19,32	19,51	19,69	19,88	20,06	20,24	20,43	20,61	18,94
	x	14,38	14,46	14,55	14,63	14,71	14,80	14,88	14,96	15,05	15,19	15,32	15,46	15,60	15,74	15,87	16,01	15,27
	Z	22,90	23,06	23,21	23,37	23,53	23,69	23,85	24,01	24,16	24,39	24,62	24,84	25,07	25,30	25,52	25,75	24,33
	Ф	38,91	38,86	38,81	38,76	38,71	38,67	38,62	38,57	38,52	38,51	38,50	38,49	38,48	38,47	38,46	38,45	38,88
3,1	r	18,21	18,35	18,48	18,62	18,76	18,90	19,04	19,18	19,32	19,51	19,69	19,88	20,06	20,24	20,43	20,61	18,94
	x	14,39	14,48	14,56	14,65	14,73	14,81	14,90	14,98	15,06	15,20	15,34	15,48	15,61	15,75	15,89	16,03	15,27
	Z	23,21	23,37	23,53	23,69	23,85	24,02	24,18	24,34	24,50	24,73	24,96	25,19	25,42	25,65	25,88	26,11	24,33
	Ф	38,34	38,29	38,24	38,19	38,14	38,09	38,04	37,99	37,94	37,93	37,92	37,91	37,90	37,89	37,88	37,87	38,88
Σ		1	1	0	0	0	1	2	1	2	3	3	2	1	1	1	1	

Рисунок 4.15 – Фрагмент матрицы с совмещёнными рассчитанными и измеренными параметрами петли КЗ по результатам второго эксперимента

Из приведенных данных видно, что наибольшее количество совпадений рассчитанных и измеренных данных параметров петли короткого замыкания соответствуют дуге 2,9 и 3 Ом и колонкам с местами КЗ 1001-1001,1км (самая верхняя строка матрицы). Это означает, что расчётное место КЗ произошло на 1001км или 1001,1км. В действительности КЗ проводилось на 1001,3 км, т.е. расчётное место КЗ отличается от реального на 200-300 м.

#### 4.4.6 Определение места короткого замыкания по результатам третьего эксперимента на 1001,5 км на опоре №360

Аналогично предыдущему случаю на рисунке 4.16 приведён фрагмент матрицы, в которой совмещены рассчитанные и измеренные параметры петли КЗ при третьем КЗ. Численные значения измеренных параметров петли при втором КЗ, представлены в векторе-столбце

$R_{и}$	18,52
$X_{и}$	15,54
$Z_{и}$	24,18
$\varphi_{и}$	40,00

и размещены в крайнем правом столбце фрагмента матрицы (рисунок 4.16), причём вектор-столбец повторен при каждом значении сопротивления дуги.

петли КЗ	Ом	1000,3	1000,4	1000,5	1000,6	1000,7	1000,8	1000,9	1001	1001,1	1001,2	1001,3	1001,4	1001,5	1001,6	1001,7	1001,8	данные
2,5	r	16,12	16,24	16,35	16,47	16,59	16,71	16,82	16,98	17,14	17,30	17,46	17,61	17,77	17,93	18,09	18,24	18,52
	x	14,48	14,56	14,64	14,73	14,81	14,89	14,98	15,11	15,25	15,39	15,52	15,66	15,80	15,94	16,07	16,21	15,54
	Z	21,67	21,81	21,95	22,10	22,24	22,38	22,52	22,73	22,94	23,15	23,36	23,57	23,78	23,99	24,20	24,41	24,18
	φ	41,94	41,90	41,85	41,81	41,76	41,72	41,67	41,67	41,66	41,66	41,65	41,64	41,64	41,63	41,63	41,62	40,00
2,6	r	16,51	16,63	16,76	16,88	17,00	17,12	17,24	17,40	17,57	17,73	17,89	18,05	18,21	18,38	18,54	18,70	18,52
	x	14,49	14,58	14,66	14,74	14,82	14,91	14,99	15,13	15,26	15,40	15,54	15,68	15,81	15,95	16,09	16,23	15,54
	Z	21,97	22,12	22,26	22,41	22,55	22,70	22,85	23,06	23,27	23,48	23,70	23,91	24,12	24,33	24,55	24,76	24,18
	φ	41,28	41,23	41,19	41,14	41,10	41,05	41,01	41,00	40,99	40,99	40,98	40,97	40,97	40,96	40,95	40,95	40,00
2,7	r	16,91	17,03	17,16	17,28	17,41	17,53	17,66	17,82	17,99	18,16	18,32	18,49	18,66	18,82	18,99	19,16	18,52
	x	14,51	14,59	14,67	14,76	14,84	14,92	15,00	15,14	15,28	15,42	15,55	15,69	15,83	15,97	16,10	16,24	15,54
	Z	22,28	22,43	22,58	22,72	22,87	23,02	23,17	23,39	23,60	23,82	24,04	24,25	24,47	24,68	24,90	25,11	24,18
	φ	40,64	40,59	40,54	40,50	40,45	40,40	40,36	40,35	40,34	40,33	40,33	40,32	40,31	40,31	40,30	40,29	40,00
2,8	r	17,30	17,43	17,56	17,69	17,82	17,95	18,07	18,24	18,42	18,59	18,76	18,93	19,10	19,27	19,44	19,61	18,52
	x	14,52	14,60	14,69	14,77	14,85	14,94	15,02	15,16	15,29	15,43	15,57	15,71	15,84	15,98	16,12	16,26	15,54
	Z	22,59	22,74	22,89	23,04	23,20	23,35	23,50	23,72	23,94	24,16	24,38	24,60	24,82	25,04	25,25	25,47	24,18
	φ	40,01	39,96	39,92	39,87	39,82	39,77	39,73	39,72	39,71	39,70	39,69	39,69	39,68	39,67	39,66	39,65	40,00
2,9	r	17,70	17,83	17,96	18,09	18,23	18,36	18,49	18,67	18,84	19,02	19,19	19,37	19,54	19,72	19,89	20,07	18,52
	x	14,53	14,62	14,70	14,78	14,87	14,95	15,03	15,17	15,31	15,45	15,58	15,72	15,86	16,00	16,13	16,27	15,54
	Z	22,90	23,05	23,21	23,37	23,52	23,68	23,83	24,05	24,28	24,50	24,72	24,95	25,17	25,39	25,61	25,84	24,18
	φ	39,40	39,36	39,31	39,26	39,21	39,16	39,11	39,10	39,10	39,09	39,08	39,07	39,06	39,05	39,04	39,03	40,00
3	r	18,09	18,23	18,36	18,50	18,63	18,77	18,91	19,09	19,27	19,45	19,63	19,81	19,99	20,17	20,35	20,53	18,52
	x	14,55	14,63	14,71	14,80	14,88	14,96	15,05	15,19	15,32	15,46	15,60	15,74	15,87	16,01	16,15	16,29	15,54
	Z	23,21	23,37	23,53	23,69	23,85	24,01	24,16	24,39	24,62	24,84	25,07	25,30	25,52	25,75	25,98	26,20	24,18
	φ	38,81	38,76	38,71	38,67	38,62	38,57	38,52	38,51	38,50	38,49	38,48	38,47	38,46	38,45	38,44	38,43	40,00
3,1	r	18,48	18,62	18,76	18,90	19,04	19,18	19,32	19,51	19,69	19,88	20,06	20,24	20,43	20,61	20,80	20,98	18,52
	x	14,56	14,65	14,73	14,81	14,90	14,98	15,06	15,20	15,34	15,48	15,61	15,75	15,89	16,03	16,16	16,30	15,54
	Z	23,53	23,69	23,85	24,02	24,18	24,34	24,50	24,73	24,96	25,19	25,42	25,65	25,88	26,11	26,34	26,57	24,18
	φ	38,24	38,19	38,14	38,09	38,04	37,99	37,94	37,93	37,92	37,91	37,90	37,89	37,88	37,87	37,86	37,85	40,00
Σ		1	1	0	1	1	1	1	2	1	3	2	2	1	2	1	0	

Рисунок 4.16 – Фрагмент матрицы с совмещёнными рассчитанными и измеренными параметрами петли КЗ по результатам третьего эксперимента

Из приведенных данных видно, что наибольшие совпадения рассчитанных и измеренных данных параметров петли короткого замыкания соответствуют дуге 2,8 Ом и колонкам с местом КЗ 1001,2км (самая верхняя строка матрицы). Это означает, что расчётное место КЗ произошло на 1001,2км. В действительности КЗ проводилось на 1001,5км, т.е. расчётное место отличается от реального места КЗ на 300 м.

**Пояснение к результатам сравнения.** На фрагментах матриц (рисунки 4.14, 4.15, 4.16) четвертым параметром короткого замыкания при определении места КЗ используется фазовый угол (ячейка зеленого цвета). В приведенных примерах этот параметр не попадает в столбцы таблиц, соответствующих найденному месту КЗ. Это объясняется тем, что интервалы, на которые разбиты сопротивления дуги, выбраны слишком крупными - 0,1 Ом

#### 4.4.7 Оценка влияния параметров внешней системы электроснабжения на погрешность определения до места КЗ по результатам эксперимента

Учитывая повышенный интерес к учёту влияния параметров внешней системы электроснабжения на параметры короткого замыкания, были



дополнительно произведены расчёты параметров петли короткого замыкания по методике, не учитывающей конфигурацию системы внешнего электроснабжения. Сопротивление системы внешнего электроснабжения в этом случае рассчитывалось по мощности короткого замыкания на вводах подстанций.

На рисунке 4.17 показан фрагмент совмещённой матрицы, поясняющей погрешность при определении места КЗ на 998 км: ячейки с яркой заливкой – при учёте особенностей схемы внешней сети; ячейки с бледной заливкой – без учёта особенностей схемы внешней сети.

Результаты показывают, что в случае с учетом внешней системы энергоснабжения место КЗ определено на 997,6 км вместо 998км, т.е. на 100 м точнее, чем без учета внешней системы энергоснабжения (997,5 км).



Рисунок 4.17 – Фрагмент матрицы, показывающий погрешность в определении места КЗ с учетом фактора сопротивления внешних сетей при КЗ на 998 км



Сравнения, проведенные при КЗ на 1001,3 км и 1001,5 км при тех же условиях учёта сопротивления внешней системы, показали, что разница в показаниях места КЗ также не превышает 100м.

#### 4.6 Проблема учёта влияния токовой нагрузки электровозов на точность определения места короткого замыкания

Учёт влияния электровозов, находящихся в межподстанционной зоне в момент короткого замыкания, на точность определения места короткого замыкания представляет особую проблему, которая в течение длительного времени исследовалась многими авторами.

Теоретические [57,86,87,88,91] и экспериментальные [87,94] исследования при КЗ в тяговой сети показали, что резкое снижение напряжения в тяговой сети приводит либо к запираанию электровоза, либо к снижению тока электровоза.

Компьютерное моделирование [89,90,92,93,94] позволило получить динамику тока электровоза при коротком замыкании в тяговой сети (рисунок 4.18), которая, как показывает сравнение, соответствует теоретическим и экспериментальным исследованиям.

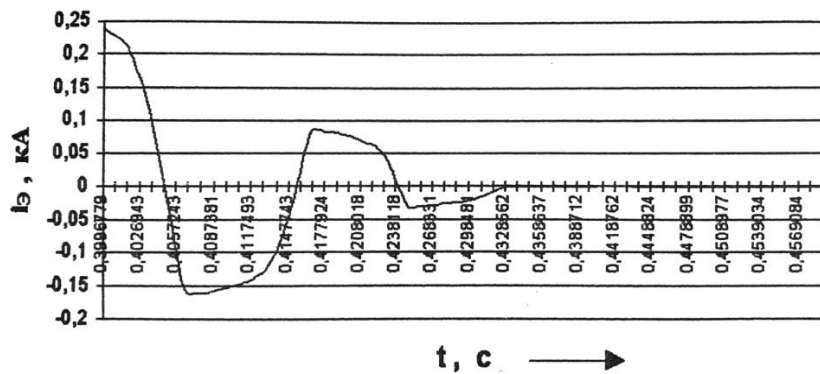


Рисунок 4.18 – Динамика тока электровоза при коротком замыкании в тяговой сети

По результатам моделирования получено [89] влияние степени снижения напряжения в тяговой сети на ток электровоза (рисунок 4.19).

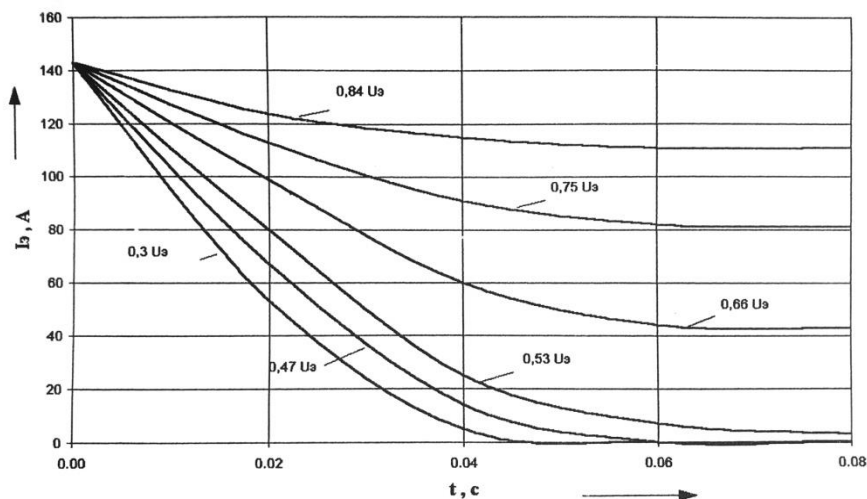


Рисунок 4.19 – Влияние степени снижения напряжения в тяговой сети на ток электровоза

На графиках рисунка 4.19 видно, что при падении напряжения в тяговой сети более 50% происходит заклинивание электровоза.

Зависимость тока электровоза от степени резкого снижения напряжения в момент короткого замыкания по данным [57] может быть представлена формулой

$$I_{\text{ЭК}} = I_{\text{ЭН}} \left( a \frac{U_{\text{ЭК}}}{U_{\text{ЭН}}} - b \right), \quad (4.1)$$

где:  $U_{\text{ЭК}}$  – напряжение на электровозе при КЗ в контактной сети;

$I_{\text{ЭК}}$  – ток электровоза при  $U_{\text{ЭК}}$ ;

$U_{\text{ЭН}}$  – напряжение на токоприёмнике в нормальном режиме;

$I_{\text{ЭН}}$  – ток электровоза при  $U_{\text{ЭН}}$ ;

$a, b$  – коэффициенты, зависящие от времени с момента КЗ (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Зависимость коэффициентов  $a, b$  от времени с момента КЗ

Время с момента КЗ, мс	Значения коэффициентов	
	$a$	$b$
10	1,7	0,42
20	2.2	0,85
40	2,5	1,1

По данным [57] при  $U_{ЭК} \leq 0,5U_{ЭН}$  токовую нагрузку электровозов практически можно не учитывать. На расстоянии до 12 км от места глухого КЗ электровозы находятся в режиме бестоковой паузы. На расстоянии до 22-25 км ток электровоза может составлять от 30 до 70% и его, практически при длине межподстанционной зоны 40-50 км можно не учитывать. Это расстояние уменьшается, если короткое замыкание происходит через дугу.

Случайный характер значений параметров дуги, числа поездов, мест расположения поездов и их токовой нагрузки требуют дальнейшего совершенствования методов решения этой проблемы.

В работе [92] предложено определять уровни напряжения на токоприёмнике каждого поезда в момент короткого замыкания методом последовательных приближений для заданной схемы расположения поездов на межподстанционной зоне. При этом на каждом шаге расчёта требуется уточнять токи поездов по формуле (4.1). Сложность практической реализации такого подхода состоит в том, что заранее не известно место короткого замыкания, так как оно является искомым, и не известно заранее сопротивление дуги. Кроме того, существует неопределённость формирования «заданной схемы», так как у энергодиспетчера нет информации о реальном расположении поездов и их токовых нагрузок на момент короткого замыкания в тяговой сети. Частично избавиться от неопределённости поездной ситуации можно, выполнив расчёт при среднем и максимальном числе поездов на зоне с коротким замыканием.

Более точный подход к решению проблемы учёта влияния поездов на определение места КЗ возможен только при оперативном контроле реального положения поездов [11,101] и их токовых нагрузок.

Реализация такого проекта требует технической работы по включению информации о реальном положении поездов в АРМ энергодиспетчера. В этом случае для решения рассматриваемой проблемы метод «С» может быть эффективным поскольку по технологии метода «С» не требуется заранее знать сопротивление дуги.

#### 4.5 Выводы по главе

1. Предлагаемый метод «С» позволяет определить место КЗ с приемлемой погрешностью 200 – 400 м.

2. Эксперимент показал, что параметр петли короткого замыкания  $X$  в составе метода «С» имеет наибольшее количество совпадений показаний места КЗ по сравнению с другими параметрами даже при двустороннем питании. Точность метода «С» выше чем точность метода «Х», в котором используется отдельно взятый параметр  $X$ , поскольку метод «С» имеет больший набор сравниваемых параметров, что обеспечивает более узкую полосу разброса параметров, указывающих место КЗ.

3. Метод «С», основанный на современных компьютерных технологиях и матричном анализе, позволяет определять место КЗ в тяговых сетях любой сложности конфигурации, не изменяя алгоритма программы расчёта.

4. Детализированное компьютерное моделирование тяговой сети позволяет максимально учесть её неоднородности, включая схему внешнего электроснабжения.

5. Целесообразно рекомендовать применение метода «С» в составе технических средств устройств цифровой защиты и автоматики фидера контактной сети ИнТер-27,5-ФКС для повышения точности определения места короткого замыкания.

## Заключение

1. Произведён анализ существующих методов определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Отмечено, что по этой тематике разработано большое количество методов, теоретических и практических исследований, издано много научных публикаций. Это свидетельствует о сложности, практической значимости и актуальности проблемы определения удалённости короткого замыкания. Однако, при разработке существующих методов использовались сложные аналитические выражения и измерения. С целью упрощения применялось эквивалентирование элементов тяговой сети и недостаточный учёт неоднородностей её структуры, что влияет на точность определения места короткого замыкания.

2. Исследованы и обозначены существующие неоднородности структуры тяговой сети, которые потенциально могут влиять на погрешности при определении места повреждения.

3. Выполнен анализ влияния параметров тяговой сети и дуги на параметры петли короткого замыкания. Установлено, что только совокупность измеренных и производных параметров петли короткого замыкания может быть использована при определении места короткого замыкания.

4. Создана детализированная компьютерная модель тяговой сети, в которой платформой моделирования избран Matlab, а математическим аппаратом – матричный анализ. В модели к минимуму сведено эквивалентирование элементов тяговой сети и учитывается большинство неоднородностей структуры тяговой сети.

5. Разработан метод определения места короткого замыкания, получивший название метод «С», содержащий способ и алгоритм его использования, который позволяет с повышенной точностью определять удаленность места устойчивого короткого замыкания. Дано математическое обоснование метода. На способ определения места короткого замыкания получен патент.

6. Детализированная модель является основой метода «С». Модель позволяет рассчитывать схемы тяговой сети любой сложности, используя единый алгоритм расчёта.

7. Выполнен анализ влияния неоднородностей структуры тяговой сети, дуги, схем питания и степени их детализации на погрешности при определении места короткого замыкания.

8. Проведена экспериментальная проверка предлагаемого метода на действующем двухпутном участке СКЖД Старая Станица – Погорелово, оборудованном системами регистрации и сбора данных. Результаты эксперимента показали, что метод «С» позволяет с погрешностью 300- 400м, определять место короткого замыкания.

### **Рекомендации и перспективы разработки темы**

1. Детализированная компьютерная модель тяговой сети требует подготовки и переработки больших объёмов исходной цифровой информации. Внедрение на железнодорожном транспорте цифровых и компьютерных технологий способствует успешному решению этой задачи.

2. Предлагается создание комплекса, объединяющего предложенный метод «С» с техническими средствами устройств цифровой защиты и автоматики фидера контактной сети ИнТер-27,5-ФКС с целью их совместной практической реализации.

**Библиографический список**

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт // М., Энергоиздат, 1982.
2. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд, А.С. Малый под ред. Г.М. Шалыта – 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Энергоатомиздат, 1983. 156 с.
3. Айзенфельд, А.И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлением / А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт // М.: Энергия, 1977. 147 с.
4. Аржанников, Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю / Е.А. Аржанников // М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Белотелов, А.К. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи / А.К. Белотелов, А.С. Саухатас, И.А. Иванов, Д.Р. Любарский // Электрические станции, 1997, N 12, С. 7-12.
6. Лямец, Ю.Я. Диагностика линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов, Г.С. Нудельман, Н.В. Подшивалин // Электрические микропроцессорные устройства и системы. Межвузовский сб. научн. тр. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета.
7. Кузнецов, А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.П. Кузнецов // М.: Энергоатомиздат, 1989. 197 с.
8. Жарков Ю.И., Микаэльян М.В., Семёнов Ю.Г. Топографический способ определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Патент RU2668663C1\_20181002
9. Левин, Г.М. Устройство для определения расстояния до мест повреждений контактной сети постоянного тока / Г.М. Левин, В.А. Зимаков //Электронные схемы автоматики и защиты тяговых подстанций железных дорог. Труды ВНИИЖТ. М.: Трансжелдориздат, 1966. Вып. 315. С. 46-66.
10. Левин, Г.М. Погрешность волнового метода при определении расстояния

до места повреждения контактной сети постоянного тока / Г.М. Левин // Труды ВНИИЖТ. М.: Трансжелдориздат, 1966. Вып. 315. С. 67-75.

11. Определение мест коротких замыканий в тяговых сетях при помощи технологии DAS. Железные дороги мира 2017, №11, с. 67–74.

12. А.с. 161410 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 г, В 61 т. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог переменного тока / Е.П. Фигурнов, Ю.Я. Самсонов (СССР). №787278/24-7; Заявл. 16.07.1962; Опубл. 19.03.1964, Бюл. №7.

13. Самсонов Ю.Я. Указатель места короткого замыкания для контактных сетей переменного тока и анализ его погрешностей. //Использование полупроводников в релейной защите и измерительной технике. /Труды РИИЖТ. М.: Транспорт, 1965. Вып. 52. С.44-56.

14. Самсонов Ю.Я. Устройство для обнаружения мест повреждения в контактных сетях переменного тока. //Вопросы релейной защиты устройств электрических железных дорог. /Труды РИИЖТ. М.: Транспорт, 1966. Вып. 60. С.84-88.

15. Зимаков В.А., Левин Г.М. Устройства для определения расстояния до мест повреждения на контактной сети электрических железных дорог переменного тока. //Применение электронной техники в системах управления электротяговых устройств. / Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1967. Вып. 336. С. 102-114.

16. Сухопрудский Н.Д., Корсаков Г.М. Устройство поиска мест короткого замыкания тяговой сети переменного тока в высоковольтной ЛЭП автоблокировки. //Электронная техника в автоматике электротяговых устройств. /Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1972. Вып. 467. С. 70-74.

17. Дмитриевский Г.В., Овласюк В.Я., Сухопрудский Н.Д. Автоматика и телемеханика электроснабжающих устройств. М.: Транспорт, 1970. 234 с.

18. Аппаратура автоматики и телемеханики в устройствах электроснабжения (конструкция, наука и эксплуатация) /Н.Н. Василевский, В.А. Манухов, Ю.А. Шипарев, В.М. Эрлих. М.: Транспорт, 1971. С. 26-28.



19. Система телемеханики «Лисна» для электрофицированных железных дорог /Е.Е. Бакеев, Г.М. Корсаков, В.Я. Овласюк, Н.Д. Сухопрудский. Под ред. Н.Д. Сухопрудского. М.: Транспорт, 1979. 147 с.

20. А.с. 270063 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 r 31/08. Устройство для определения места короткого замыкания в электрических сетях переменного тока / Е.П. Фигурнов (СССР). №1226196/24-7; Заявл. 21.03.1968; Оpubл. 08.05.1970, Бюл. №16.

21. А.с. 740555 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 60 М 1/100. Устройство для определения места повреждения контактной сети электрифицированной железной дороги / А.С. Бочев, В.В. Кузнецов, М.Ю. Тупченко, Е.П. Фигурнов, (СССР). №266250/24-11; Заявл. 13.09.1978; Оpubл. 15.06.1980, Бюл. №22.

22. А.с. 1187112 СССР. МКИ<sup>3</sup> G 01 R 31/08. Устройство для определения места короткого замыкания в линии электропередачи / Ю.И. Жарков, В.А. Зайцев, Е.П. Фигурнов, (СССР). №3740927/24-21; Заявл. 10.05.1984; Оpubл. 23.10.1985, Бюл.№39.

23. Фигурнов Е.П., Курганов В.В. Телеизмеритель напряжений и указатель коротких замыканий на фидерах контактной сети переменного тока. // Электроснабжение и автоматика электрифицированных дорог. / Труды РИИЖТ. Ростов н/Д, 1972. Вып. 85. С. 30-37.

24. А.с. 1395532 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 60 М 1/100. Устройство для определения места повреждения тяговой сети с автотрансформаторами электрофицированной железной дороги / А.С. Бочев, М.Ю. Тупченко, Е.П. Фигурнов, (СССР). №4075513/27-11; Заявл. 10.06.1986; Оpubл. 15.05.1988, Бюл. №18.

25. А.с.369519 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 r, 31/08; G 01 r, 19/26. Устройство для определения места короткого замыкания и телеизмерения уровней напряжения на фидерах контактной сети переменного тока / В.В. Курганов, Е.П. Фигурнов, (СССР). - №1445381/24-7; Заявл. 15.06.1970; Оpubл. 08.11.1973, Бюл. №10.

26. Hajasi M. Newtral Cwrrrent Ratui Type Fault Locator fo AT Feeding Circuit.- Дэнки тэцудо, 1973. Т.27. №5.С.11-16.

27. Hajasi M. Newtral Cwrrrent Ratui Type Fault Locator fo AT Feeding Circuit.- Дэнки тэцудо, 1973. Т.27. №1.С.17-20.

28. Fujie H./Fault locator system in auto-transformer feeding circuit of AC electric railways.- Quart.Repts.Railway Techn.Res.Inst., 1977.18.№3.S.115-119.

29. Fujie H./Fault locator system in auto-transformer feeding circuit of AC electric railways.- Quart.Repts.Railway Techn.Res.Inst., 1972.13.№1.S.44-46.

30. Тикаэ. Определение расстояния до места короткого замыкания. Дэнки тэцудо, 1978. Т.32.№6. С.11-16.

31. Бочев А.С., Кузнецов В.В., Тупченко М.Ю. Методы автоматического определения места короткого замыкания при системе питания 2х25 кВ. //Релейная защита и автоматика устройств электроснабжения железных дорог: Межвуз. сб. науч. тр. Ростов н/Д: /Тр. РИИЖТ. 1978. Вып. 144. С. 71-75.

32. Бочев А.С., Кузнецов В.В., Тупченко М.Ю. Возможный способ определения места короткого замыкания в тяговой сети 2х25 кВ. // Режимы работы, диагностика и контроль устройств электроснабжения железных дорог. / Труды РИИЖТ, вып. 153. Межвуз. сб. научн. тр. – Ростов н/Д, 1979. С. 43-47.

33. Тупченко М.Ю. Определение мест повреждения в электротяговых сетях 2х25 кВ с автотрансформаторами. Ростов н/Д. Дис. канд. техн. наук. М.: 1983. 202 с.

34. Попова Н.А. О достоверности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: Межвуз. сб. /Под ред. д.т.н., проф. Жаркова Ю.И. Ростов н/Д: РГУПС. 1995. С. 118-123.

35. Попова Н.А. Повышение точности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: Межвуз. сб. /Под ред. д.т.н., проф. Жаркова Ю.И. Ростов н/Д: РГУПС. 1995. С. 46-48.

36. А.с. 158328 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н 02 d. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети / Е.П. Фигурнов (СССР). - №798020/24-7; Заявл. 08.10.1962; Оpubл. 19.10.1963, Бюл. №21.

37. Фигурнов Е.П. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока. // Электричество, 1997. №5. С. 23-29.

38. Фигурнов Е.П., Кацпшак Я. Оценка шунтирующего влияния земли на рельсовую цепь. //Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: Межвуз. тематич. сб. Ростов н/Д: РГУПС. 1995. С. 66-72.

39. Фигурнов Е.П. Защита электротяговых сетей переменного тока от коротких замыканий. М.:Транспорт, 1979. 160 с.

40. Фигурнов Е.П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 215 с.

41. Фигурнов Е.П. Вычисление удельных параметров тяговой сети однофазного переменного тока. //Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог: Межвуз. сб. науч. тр. Ростов н/Д: РГУПС. 1995. С. 72-84.

42. Фигурнов Е.П. Сопротивление рельсовой цепи электрической сети переменного тока. // Электричество, 1989. №7. С. 17-22.

43. Фигурнов Е.П., Бочев А.С., Мишель В.А. Электротяговая сеть с компенсацией внешнего электрического поля. //Известия вузов, Электромеханика, 1983. №12. С. 76-80.

44. Фигурнов Е.П., Курганов В.В., Поляков М.Е. Устройство для выявления мест короткого замыкания. // Электрическая и тепловозная тяга, 1975. №7. С. 33-36.

45. Фигурнов Е.П., Гончарова Н.С. Переходные процессы в электротяговой сети переменного тока. // Электротехника, 1970. №7. С. 20-23.

46. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Короткие замыкания и определение их удаленности в тяговых сетях 27,5 кВ / учеб. пособие к курсовому и дипломному проектированию. РГУПС. – Ростов н/Д, 2011. 61 с.

47. Бочев А.С., Мишель В.А., Фигурнов Е.П. Условия работы тяговой сети с ЭУФ при индивидуальных заземлителях. //Режимы работы, автоматическое управление и техническая диагностика систем электроснабжения железных дорог. Межвуз. тематич. сб. Вып. 171. Ростов н/Д: РИИЖТ. 1983. С. 33-38.

48. Бочев А.С., Мунькин В.В., Фигурнов Е.П. Электрическая сеть с усиливающим и обратным проводом. //Железные дороги мира, 1997. №11. С.8-12.

49. Бочев А.С., Петрова Т.Е. Исследование сталемедных и сталеалюминиевых несущих тросов. //Режимы работы и техническая диагностика

систем электроснабжения железных дорог: Межвуз. тематич. сб. тр. Ростов н/Д: РИИЖТ. Вып. 184. 1985. С. 21-24.

50. Бочев А.С. Трехпроводные электротяговые сети переменного тока и режимы их работы: Дис. д-ра техн. наук. – М., 1986. 528 с.

51. Бочев А.С., Мишель В.А. Расчет токов короткого замыкания в электрической сети при замыкании через переходное сопротивление. // Режимы работы и техническая диагностика систем электроснабжения железных дорог: Межв. сб. Ростов н/Д: РИИЖТ. 1985. Вып. 184. С. 3-7.

52. Бочев А.С., Винников Ю.А. Метод снижения уравнильных токов тяговой сети переменного тока. //Режимы работы, автоматическое управление и техническая диагностика систем электроснабжения железных дорог: Межвуз. тематич. сб. Ростов н/Д: РИИЖТ, 1983. Вып. 171. С. 24-29.

53. Фигурнов Е.П. Защита электротяговых сетей переменного тока от коротких замыканий. М.: Транспорт, 1979. 160 с.

54. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Н.А. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 272 с.

55. Фигурнов Е.П., Стороженко Д.Е. Электрическое сопротивление рельсов. // Труды Всероссийской научно – практической конференции «Транспорт – 2004», ч.3, май 2004 г. РГУПС, 2004 г.

56. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Желдориздат, 2002.–720с.

57. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник в 2ч. ч2. 3-е изд. перер. и доп. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – 604 с.

58. Петрова Т.Е., Петров И.П. Создана программа расчета параметров короткого замыкания. //Локомотив. Электровозная и тепловозная тяга. 1995. №2. С. 37.

59. Петрова Т.Е., Петров И.П. Программа расчета параметров короткого замыкания в тяговой сети 27,5 кВ. // Автоматизированные системы

электроснабжения железных дорог: Межвуз. сб. научн. тр. Ростов н/Д: РГУПС. 1995. С. 137-141.

60. Петров И.П., Быкадоров А.Л. Методика определения влияния электровазов на погрешность определения мест повреждения контактной сети. // Материалы отраслевой научно-технической конференции, посвященной 70-летию ун-та «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта и роль молодых ученых в их решении»: Тез. докл., Ростов н/Д, РГУПС. 1998. С. 120-121.

61. Петров И.П., Филоненков А.И. Компьютерные сети и защита информации. // Проблемы повышения конкурентоспособности железнодорожных перевозок, развития станций и транспортно-складских комплексов: Сб. науч. тр. Ростов н/Д: РГУПС. 1996. Ч. 2. С. 58-62.

62. Петрова Т.Е., Петров И.П. Применение современных технологий в расчетах и в процессе обучения. // Сварные конструкции и технология их изготовления: Сб. науч. ст. Ростов н/Д: ДГТУ. 1998. С. 71-74.

63. Петров И.П. Адаптивные методы определения места повреждения в тяговой сети переменного тока и их исследование. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. Р н/Д. 1999. 282 с.

64. Патент RU 2189607, кл 7 G 01 R 31/08. Определитель удалённости повреждения контактной сети (варианты)/ Е.П.Фигурнов, Ю.И.Жарков, Д.Е.Стороженко (RU) №200110308, опубл.20.09.2002, бюл.№26.

65. Патент RU 2189606, кл 7 G 01 R 31/08. Способ определения удалённости короткого замыкания контактной сети переменного тока и устройство для его выполнения. Е.П.Фигурнов, Ю.И. Жарков, Д.Е.Стороженко (RU) №200110308, опубл.20.09.2002, бюл.№26.

66. Терминал интеллектуальный присоединений 27,5 кВ ИнТер-27,5-ФКС Руководство по эксплуатации, АВ093-00-000-00\_01 РЭ, 83 с.

67. Герман Л.А., Попов А.Ю., Саморуков А.В., Ишкин Д.В., Якунин Д.В., Субханвердиев К.С. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях. Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т.76. №5. С.266-272.

68. Распоряжение от 3 апреля 2012 г. №651р Об утверждении и вводе в действие документа «Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания» / Открытое акционерное общество «Российские железные дороги».

69. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО "РЖД". – М., "ТРАНСИЗДАТ", 2005 г.

70. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А, Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания. Вестник транспорта Поволжья. Самарский гос. ун-т. путей сообщения. «Пресса России» - 11886 ISSN – 2013. - №5(41). – С. 7-15.

71. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

72. Быкадоров А.Л. Расчёт сопротивления тяговой сети сложной конфигурации /А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Мороз<sup>1</sup>// Труды Всероссийской научно-практической конф. «Транспорт-2009», апрель 2009 в 3-х ч. Часть 3. Рост.гос.ун-т. путей сообщения, Ростов н/Д, 2009. С. 303.

73. Быкадоров А.Л. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчёта параметров петли короткого замыкания/ А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина, И.В. Гаврилов// Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. №4. С. 7-12.

74. Быкадоров А.Л. Влияние уравнивающих токов на параметры петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : тр. междунар. науч.-практ. конф., 70-летию энергет. фак. / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – С. 20-21.

75. Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока: 2-е изд., перераб. и доп. М.:

---

<sup>1</sup> Девичья фамилия автора

Транспорт, 1987. 279 с.

76. Даричев С.Х., Косарев Б.И., Мориц Э.Я. Устройства электроснабжения Байкало – Амурской магистрали. – М.: Транспорт, 1989. – 176 с.

77. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы. М.: Мир», 1977. 189 с.

78. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. М., «Энергия», 1972.

79. К. Сенди. Современные методы анализа электрических систем. М., «Энергия», 1971. 360 с.

80. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1 / Под ред. К.Г. Марквардта. М.: Транспорт, 1980. 256 с.

81. Усенко А.П., Шалимов М.Г. Активное и внутреннее индуктивное сопротивление рельса. // Науч. тр. Омск: ОмИИЖТ, 1969. т.104 ч.1 с.65-70.

82. Андреев В.В., Гречишников В.А., Шевлюгин М.В. Расчёт интегральных показателей работы разветвлённых систем тягового электроснабжения. Электротехника. – 2012. –№ 12. С. 32-36. – Фирма Знак (Москва) – 0013-5860 ISSN.

83. Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Методы вторичной обработки и распознавания изображений. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 215 с.

84. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение.//Беларусь, – Минск: Ин-т техн. Кибернетики НАН Беларуси, 2000, – 304 с.

85. Gutta S., Wechsler H. Face recognition using hybrid classifiers // Pattern Recognition 1997, Vol. 30, pp. 539-553.

86. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов короткого замыкания в контактных сетях. М.:Трансжелдориздат, 1960. 260 с.

87. Самсонов Ю.Я., Кукаркин А.В. Переходные процессы в выпрямительных электровозах при внешних коротких замыканиях.//Вопросы релейной защиты устройств электрических железных дорог./Труды РРИЖТ. М.:Транспорт. 1966. Вып. 60. 88с.

88. Фигурнов Е.П., Гончарова Н.С. Переходные процессы в электротяговой

сети переменного тока. // Электротехника. 1970. №7. С.20-23.

89. Быкадоров А.Л., Жуков А.В. Математическое моделирование систем тягового электроснабжения переменного тока. Межвуз. сб. научн. тр. Ростов н/Д. РИИЖТ. 1990. С.12-19.

90. Быкадоров. А.Л., Жуков А.В. Гибридная математическая модель динамических процессов в тяговой сети. // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог. Межвуз. Сб. 1995. С.33-38.

91. Попова Н.А. О достоверности определения расстояния до места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог. Межвуз. Сб. 1995. С.118-123.

92. Петров И.П., Быкадоров А.Л. Методика определения влияния электровазов на погрешность определения мест повреждения контактной сети. // Материалы отраслевой научно-технической конференции, посвященной 70-летию ун-та «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта и роль молодых учёных в их решении». Тез. докл., Ростов н/Д, РГУПС. 1998. С.120-121.

93. Никитенко А.Г., Плохов Е.М., Зарифьян А.А., Хоменко Б.И. // Математическое моделирование динамики электровазов. М., Высшая школа. 1998. -274с.

94. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: МИИТ, 2014. – 122 с.

95. Косарев А.Б. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев // Вестник ВНИИЖТ, 2017.- Т.76-№6.-С.329-334.

96. Герман Л.А. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменных токов при учете внешнего электроснабжения/ Л.А. Герман, К.С.Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта, 2017. №3. С.17 – 23.



97. Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. ЭЭТ 2017, №1. С. 11-15.

98. Серебряков, А.С. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме  $Y/\Delta$ -11 / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, В.Л. Осокин, К.С. Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 5. – С. 19-25.

99. Косарев А.Б., Косарев, Б.И. Анализ токораспределения в тяговых сетях переменного тока при двустороннем питании и учёте сопротивления системы внешнего электроснабжения / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев // ЭЭТ-2018, -№1, С.8-13.

100. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Учёт схем питания тяговых подстанций при расчётах коротких замыканий тяговой сети переменного тока. / Е.П. Фигурнов, Ю.И. Жарков, Н.А. Попова // Вестник ВНИИЖТ, 2019.– №1.– С.10-18.

101. Точное определение местоположения подвижного состава для автоматизированных железнодорожных систем / *ZEVrail*. – 2018. – № 9. – S. 390.

102. Дроздова О.В., Якубович М.В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключённые линии электропередачи / О.В. Дроздова, М.В. Якубович // Вестник МГТУ, том 13, №4/2, 2010 г. С.918-922.

103. Пупынин В.Н., Бычков А.Н., Мясников Л.В. Расчёт неоднородных тяговых сетей переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1972. №3. С. 15-22.

104. Косарев Б.И. Теория электрического расчёта неоднородных и сложных тяговых сетей. // Труды МИИТ. 1972. Вып. 411. С. 28-41.

105. Косарев Б.И., Бычков А.Н. Расчёт напряжений рельсы-земля в двусторонне питаемых тяговых сетях переменного тока. // Электричество. 1975. № 5. С. 39-43.

106. Бочев А.С., Мишель В.А. Расчёт токов короткого замыкания электротяговой сети при замыкании через переходное сопротивление // Труды РИИЖТ, межвуз. сб., вып. 184. Ростовна-Дону. 1985. С. 8-14.

107. Косарев Б.И., Косарев А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта //М.: Интекст. с. 480.

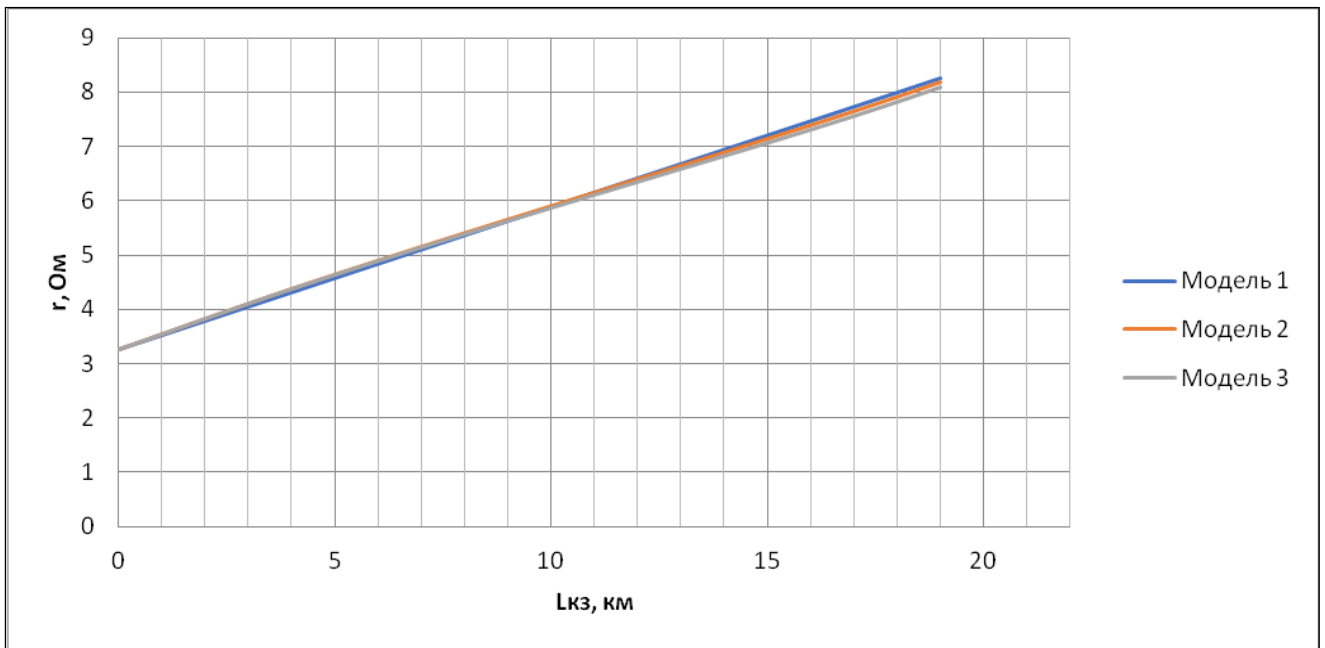
108. Карякин Р.И. Тяговые сети переменного тока // М.:Транспорт. 1964. с. 260.

109. Косарев Б.И. Теория электрического расчёта неоднородных и сложных тяговых сетей. //Труды МИИТ. 1972. Вып. 411. С. 38-41.

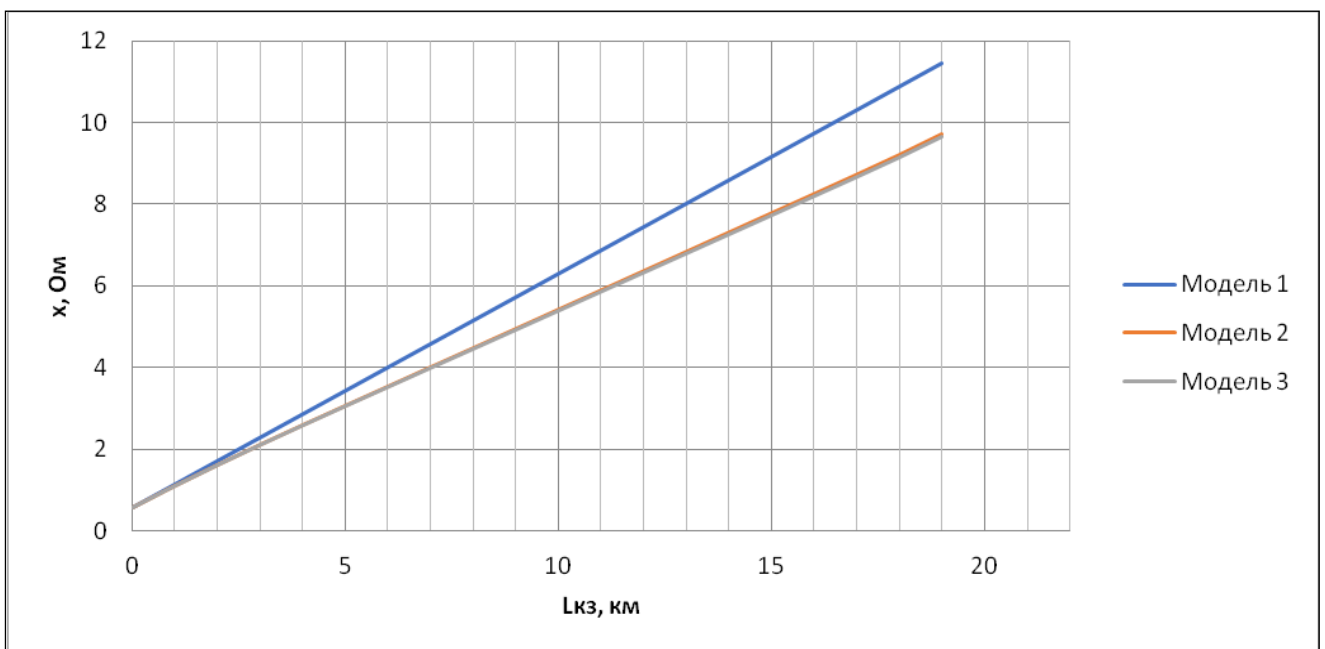
110. Косарев Б.И. Статическое моделирование переходного сопротивления рельсы - земля на электрифицированных участках с деревянными шпалами. // Электричество. 1977. № 9. С. 58 – 62.

### **Приложение 1**

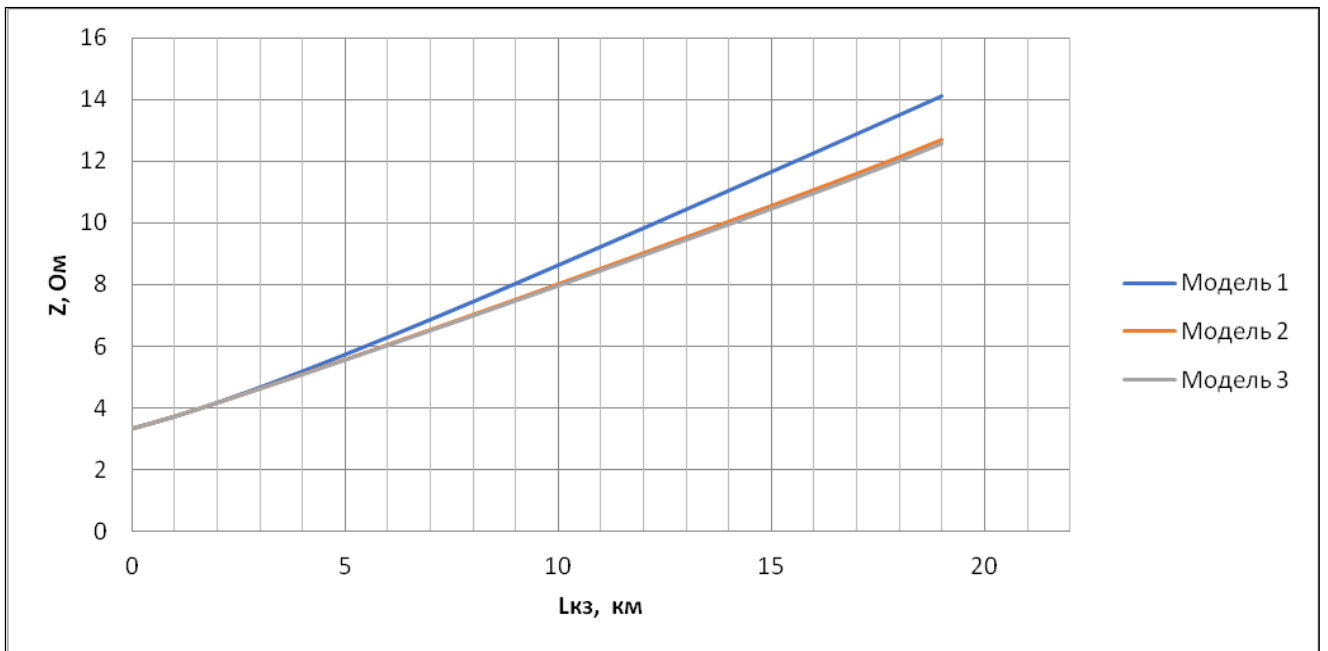
Зависимости параметров сопротивления петли короткого замыкания в результате имитационного компьютерного моделирования тяговой сети переменного тока



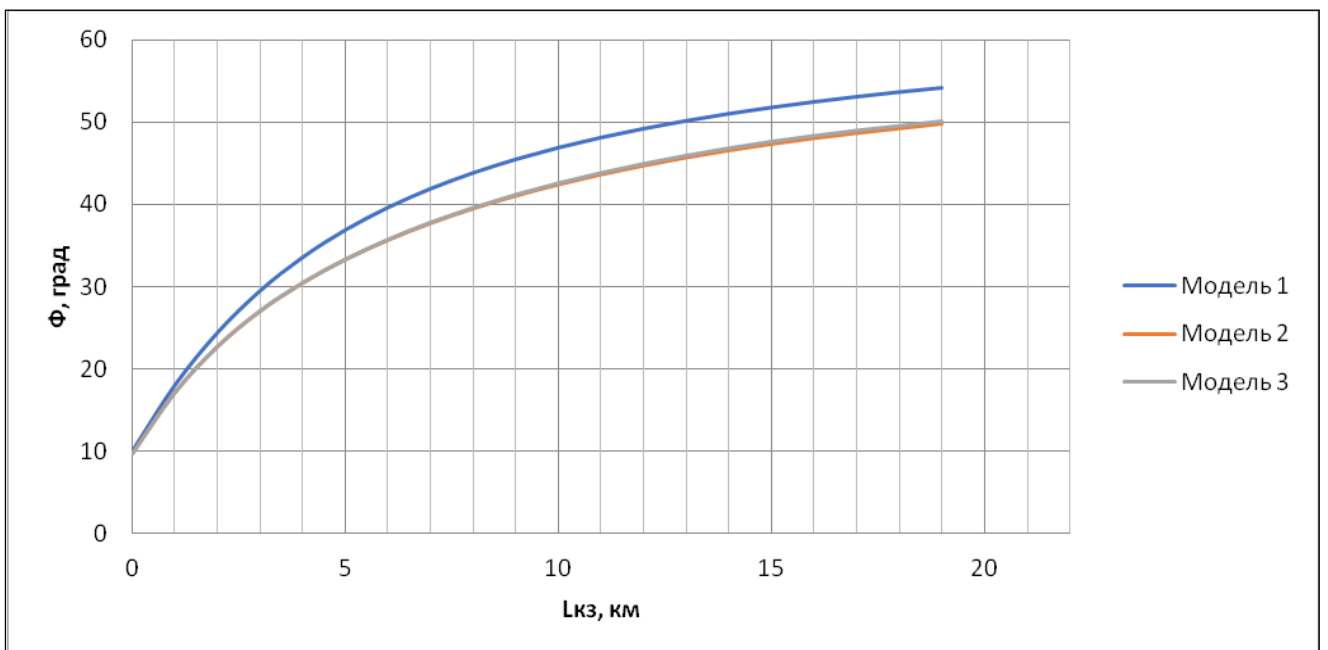
П1.1 – Влияние степени детализации модели на активную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



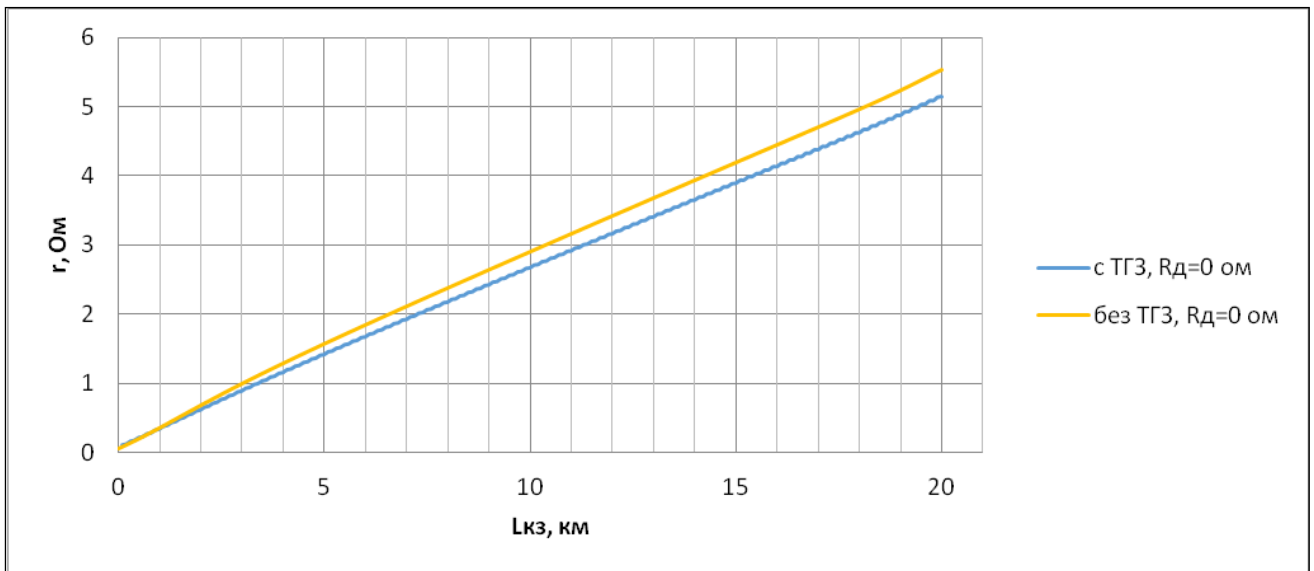
П1.2 – Влияние степени детализации модели на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



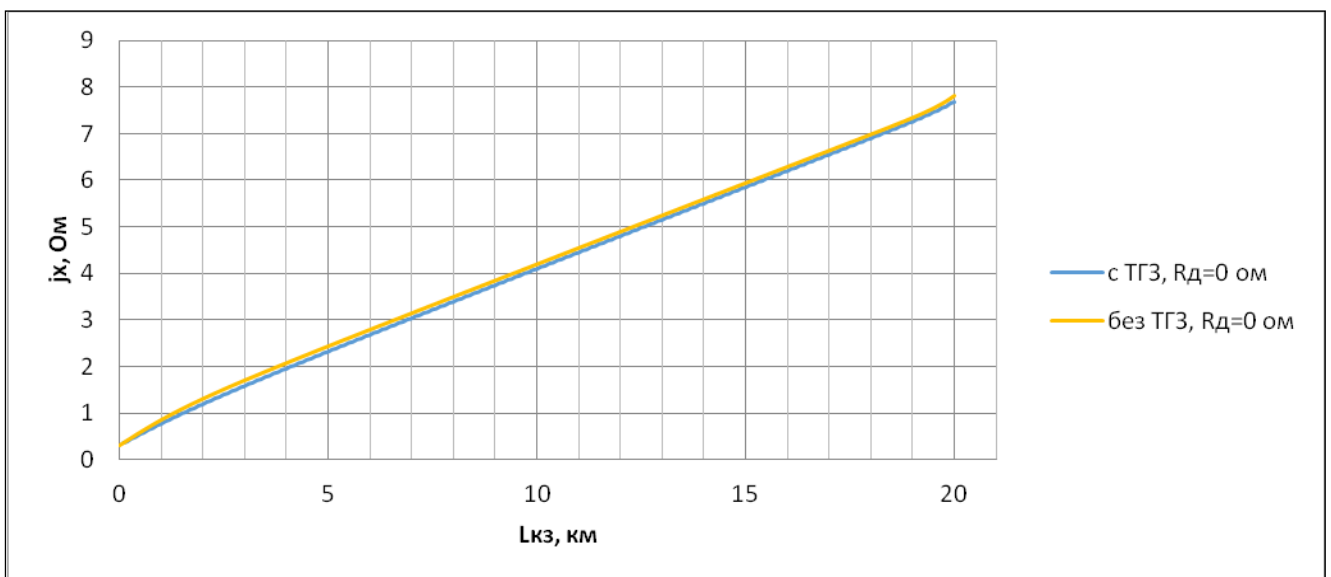
П1.3 – Влияние степени детализации модели на полное сопротивление петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



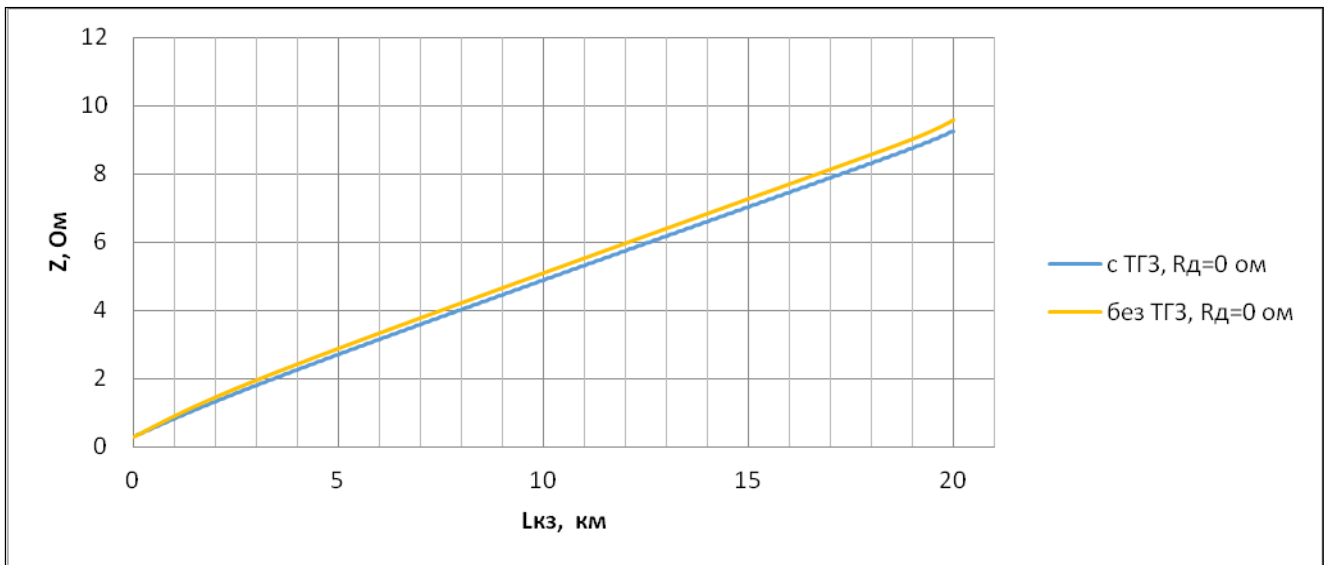
П1.4 – Влияние степени детализации модели на фазовый угол петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



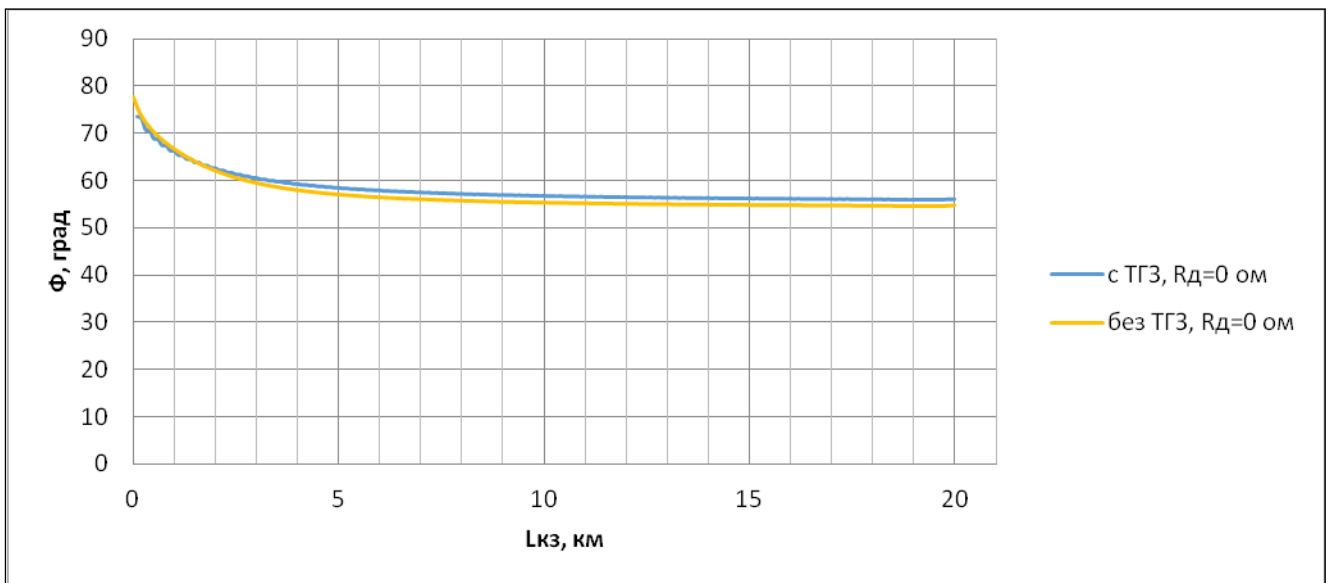
П1.5 – Влияние моделирования ТГЗ на активную составляющую сопротивления петли КЗ на однопутном участке двустороннего питания



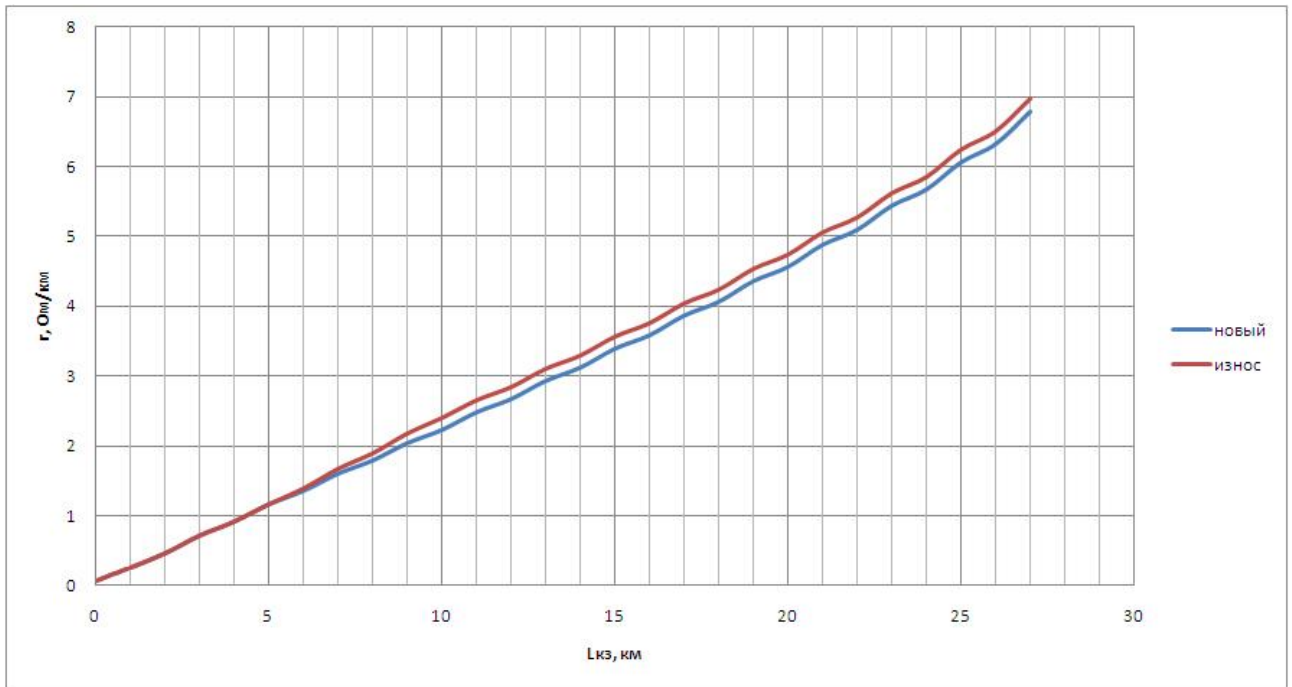
П1.6 – Влияние моделирования ТГЗ на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ на однопутном участке двустороннего питания



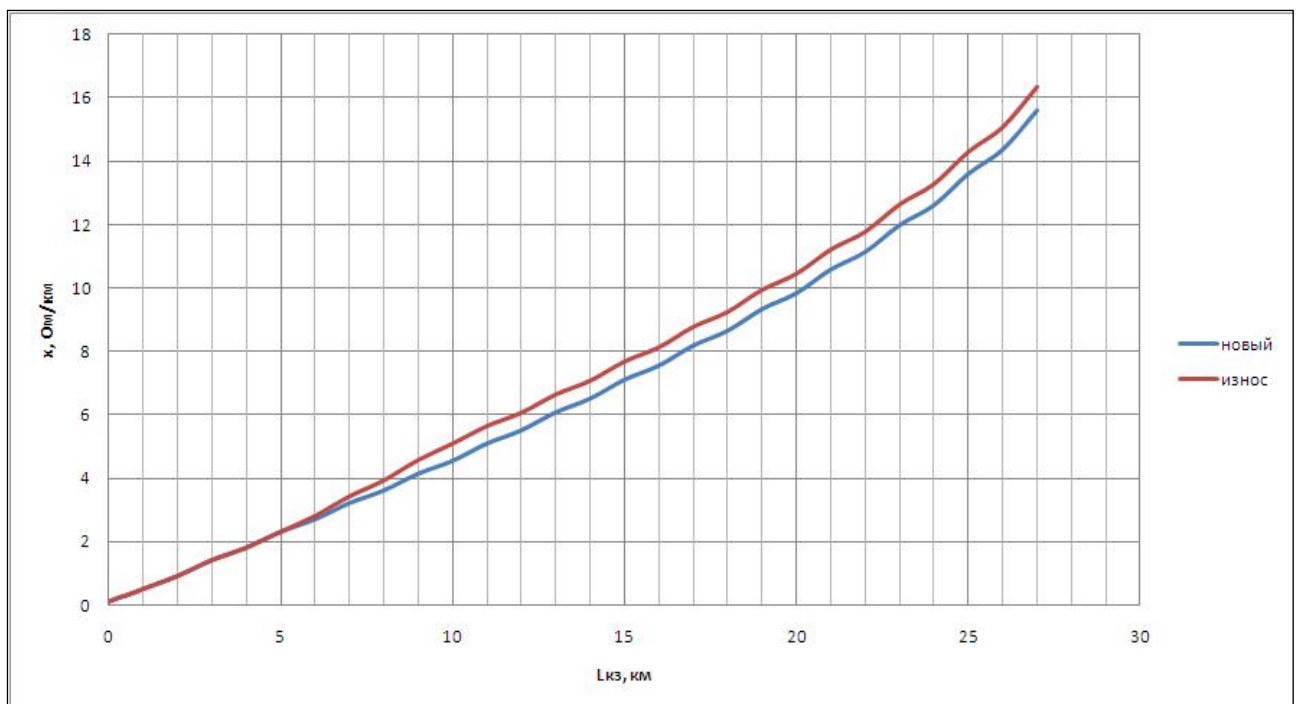
П1.7 – Влияние моделирования ТГЗ на полное сопротивление петли КЗ на однопутном участке двустороннего питания



П1.8 – Влияние моделирования ТГЗ на фазовый угол сопротивления петли КЗ на однопутном участке двустороннего питания

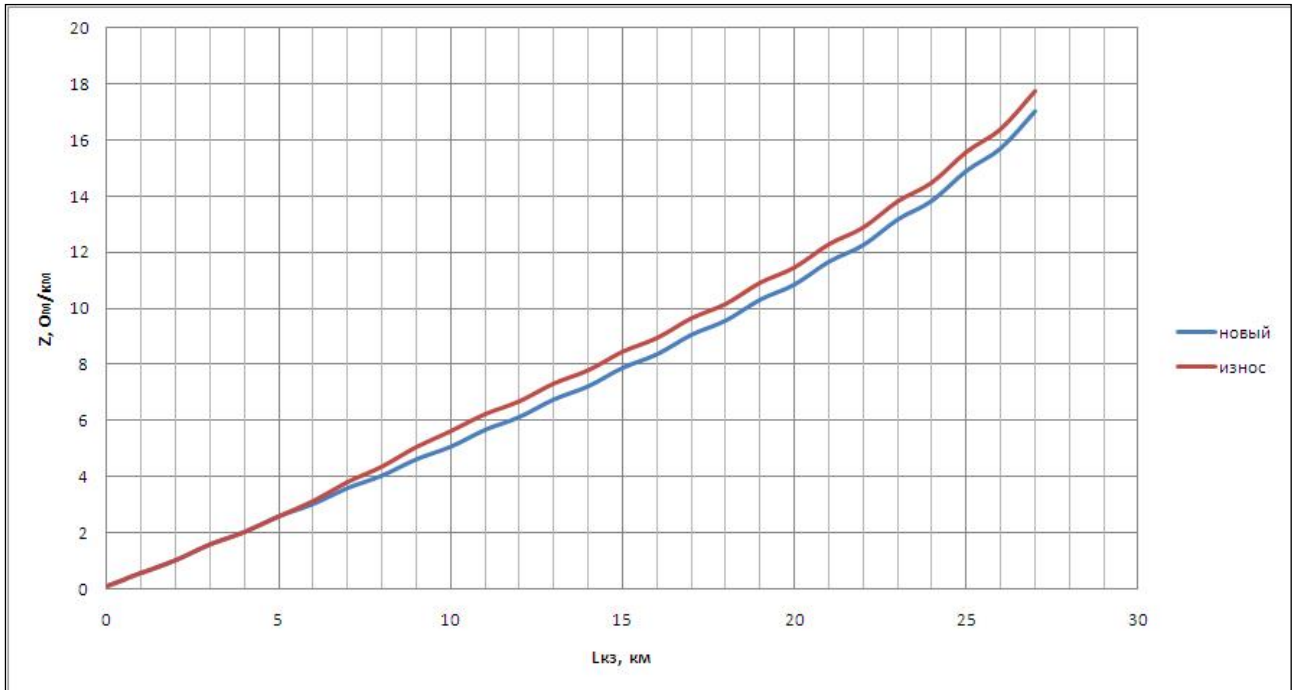


П1.9 – Влияние износа проводов на активную составляющую сопротивления петли КЗ

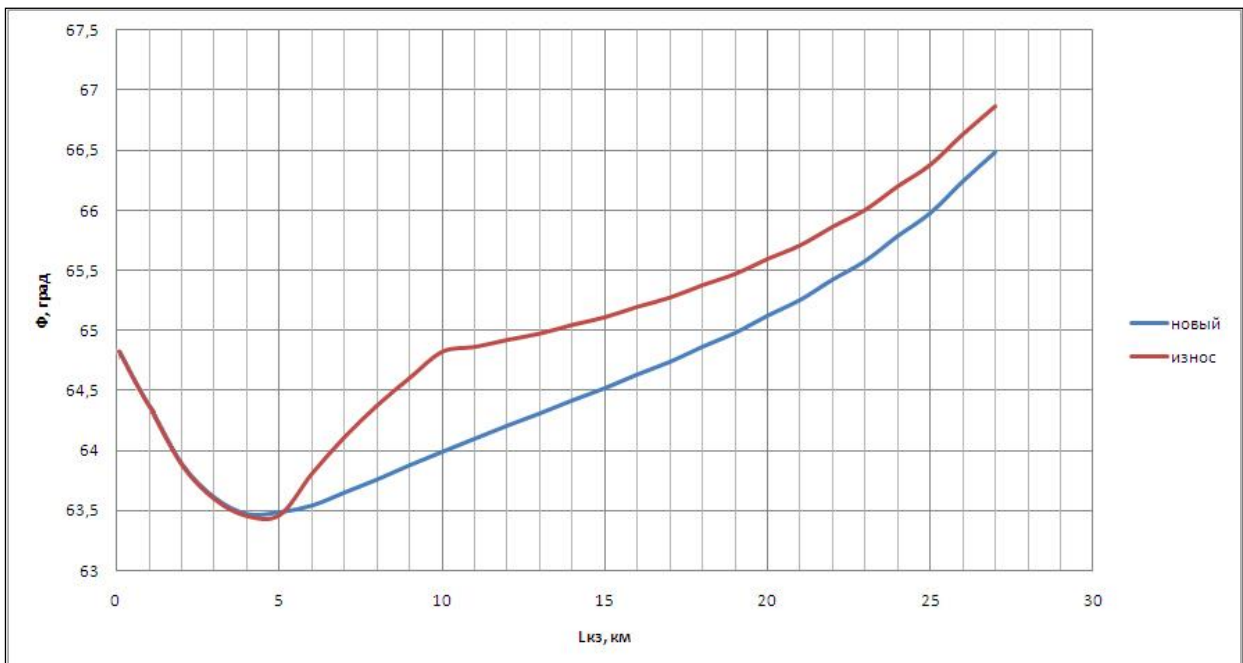


П1.10 – Влияние износа проводов на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ

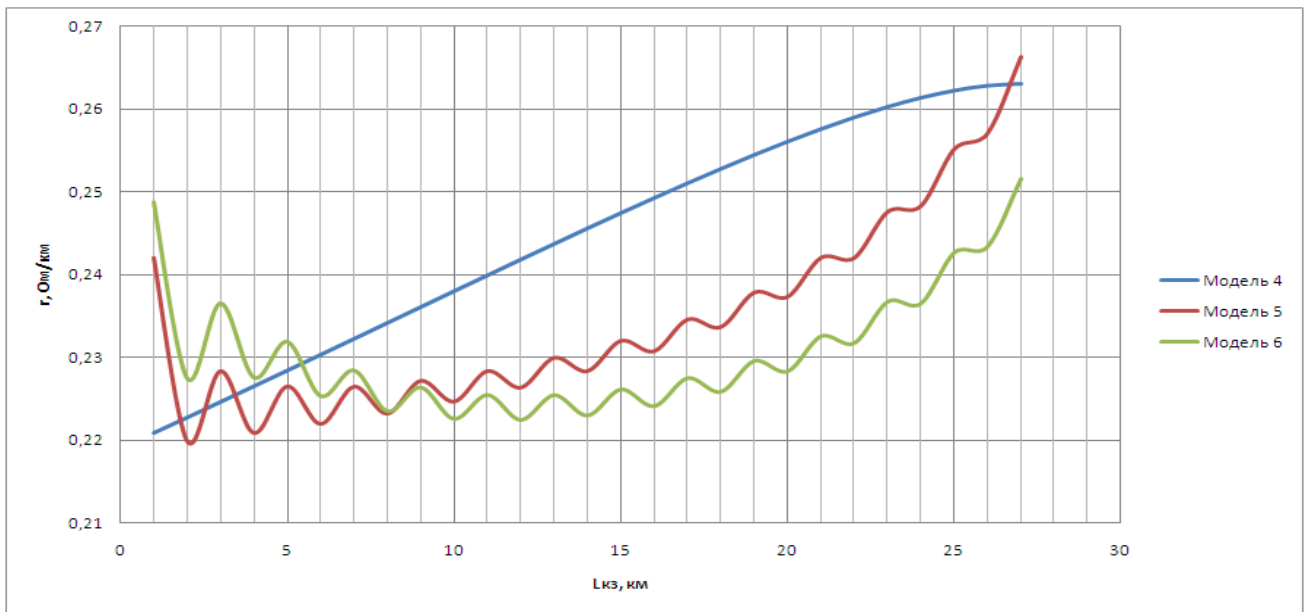




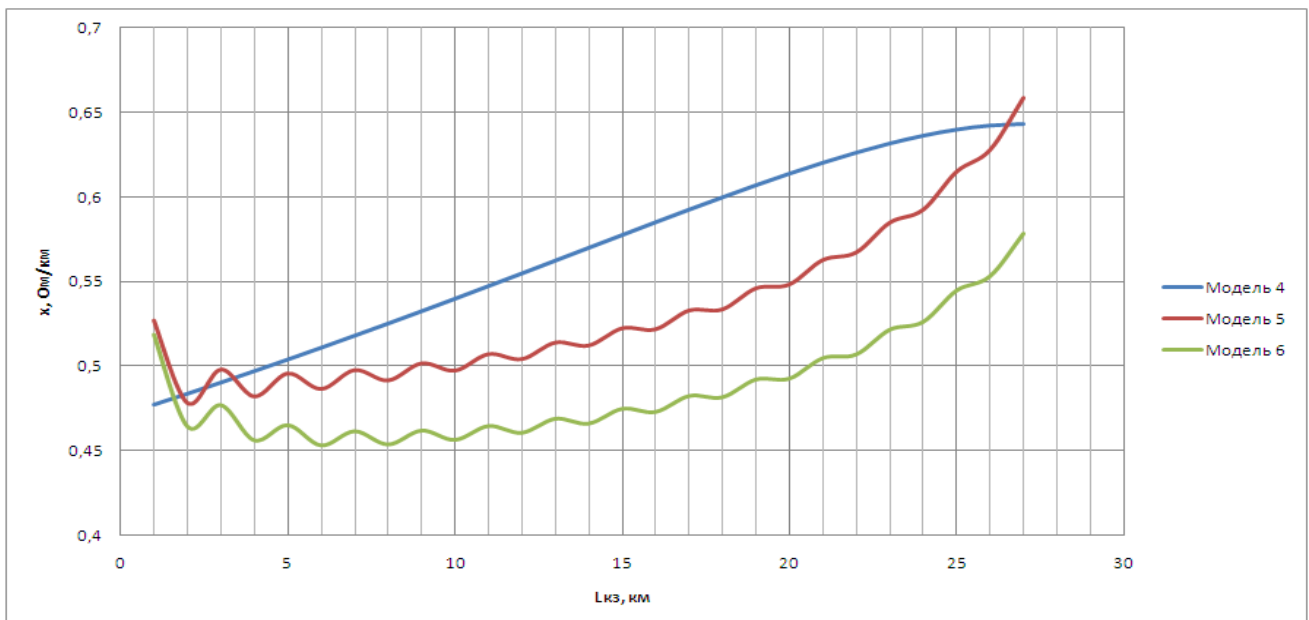
П1.11 – Влияние износа проводов на полное сопротивление петли КЗ



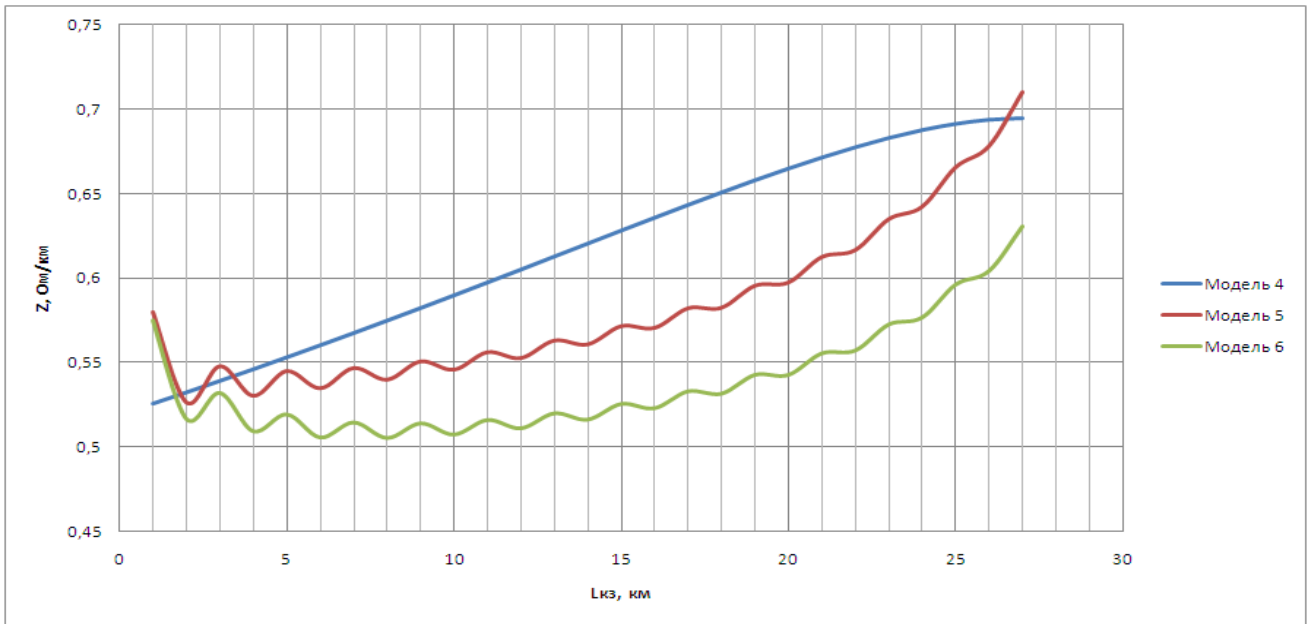
П1.12 – Влияние износа проводов на фазный угол сопротивления петли КЗ



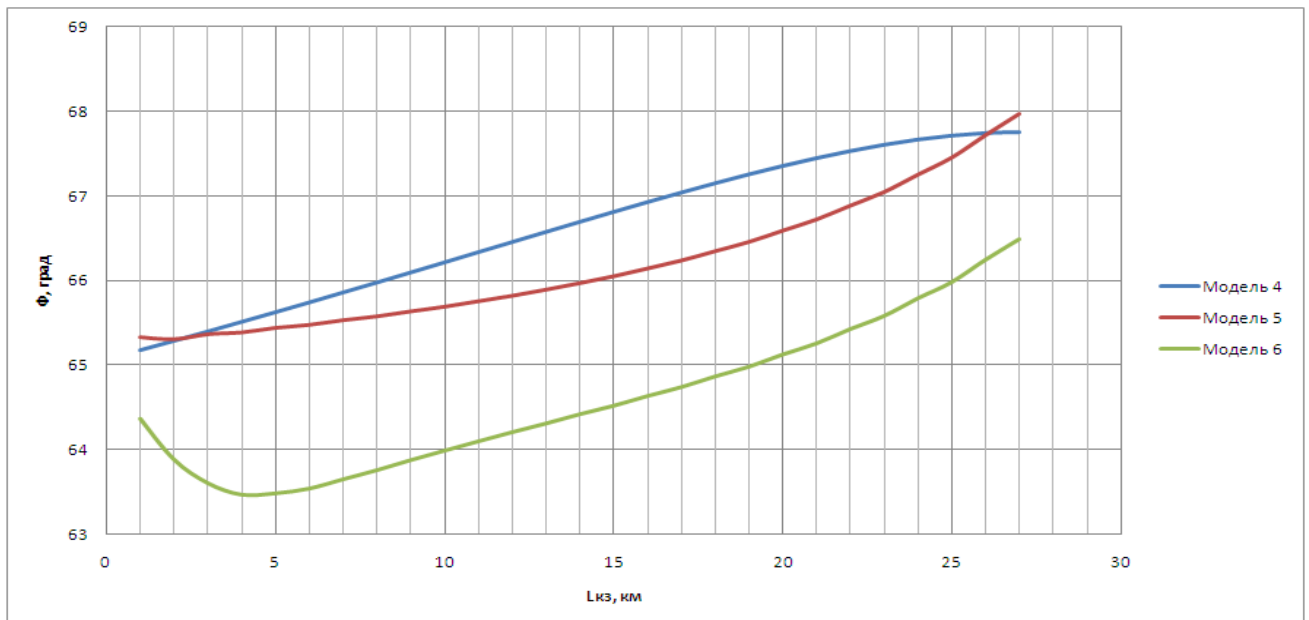
П 1.13 – Влияние степени детализации модели и удаленности места КЗ на активную составляющую удельного сопротивления тяговой сети



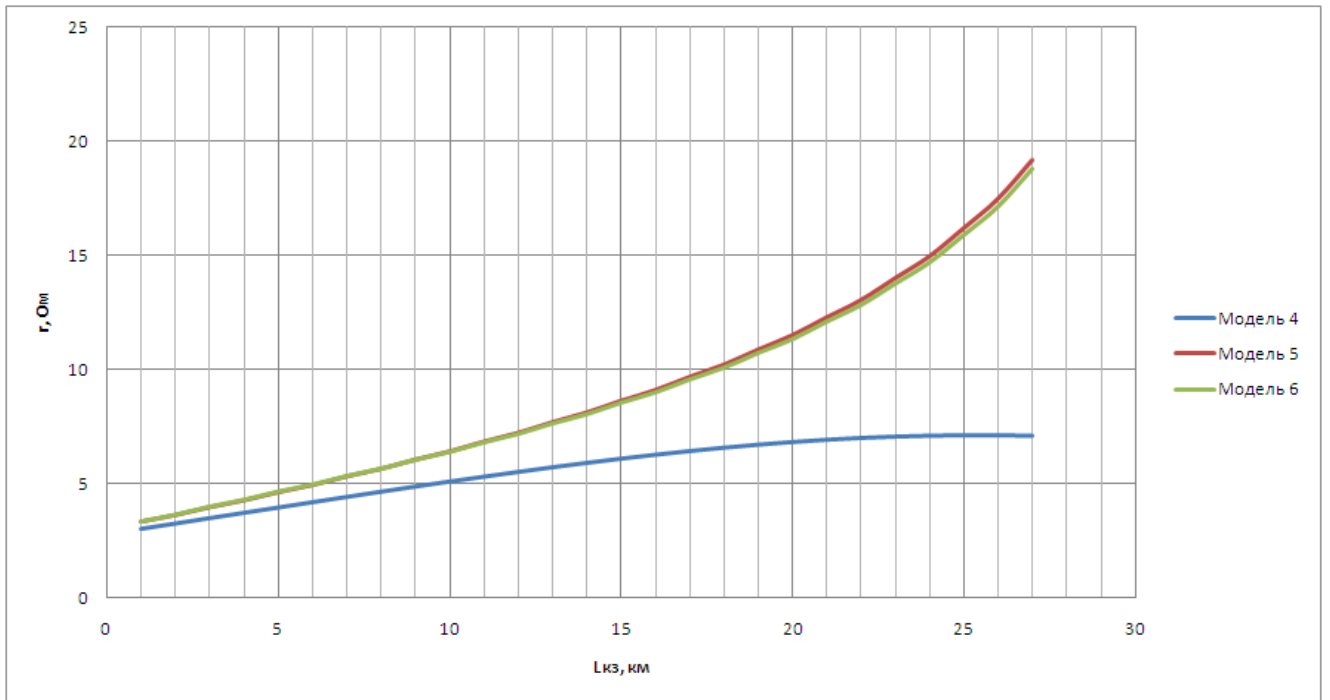
П1.14 – Влияние степени детализации модели и удаленности места КЗ на индуктивную составляющую удельного сопротивления тяговой сети



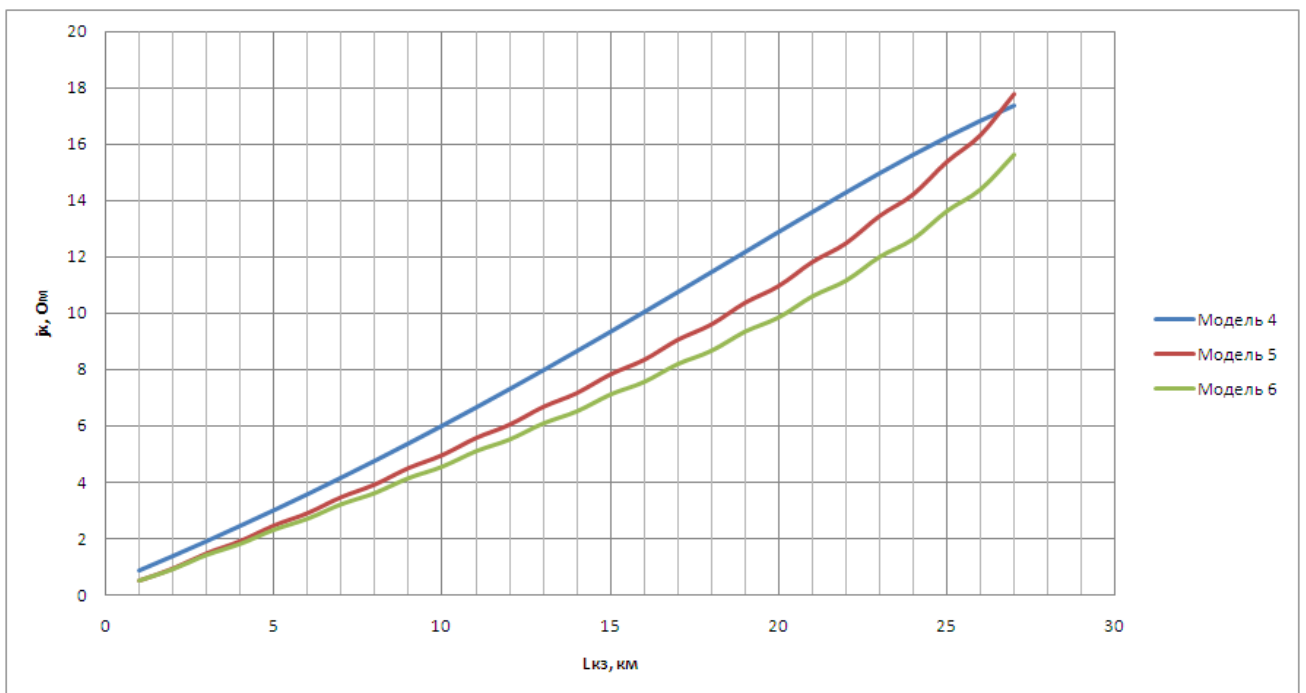
П1.15 – Влияние степени детализации модели и удаленности места КЗ на полное удельное сопротивление тяговой сети



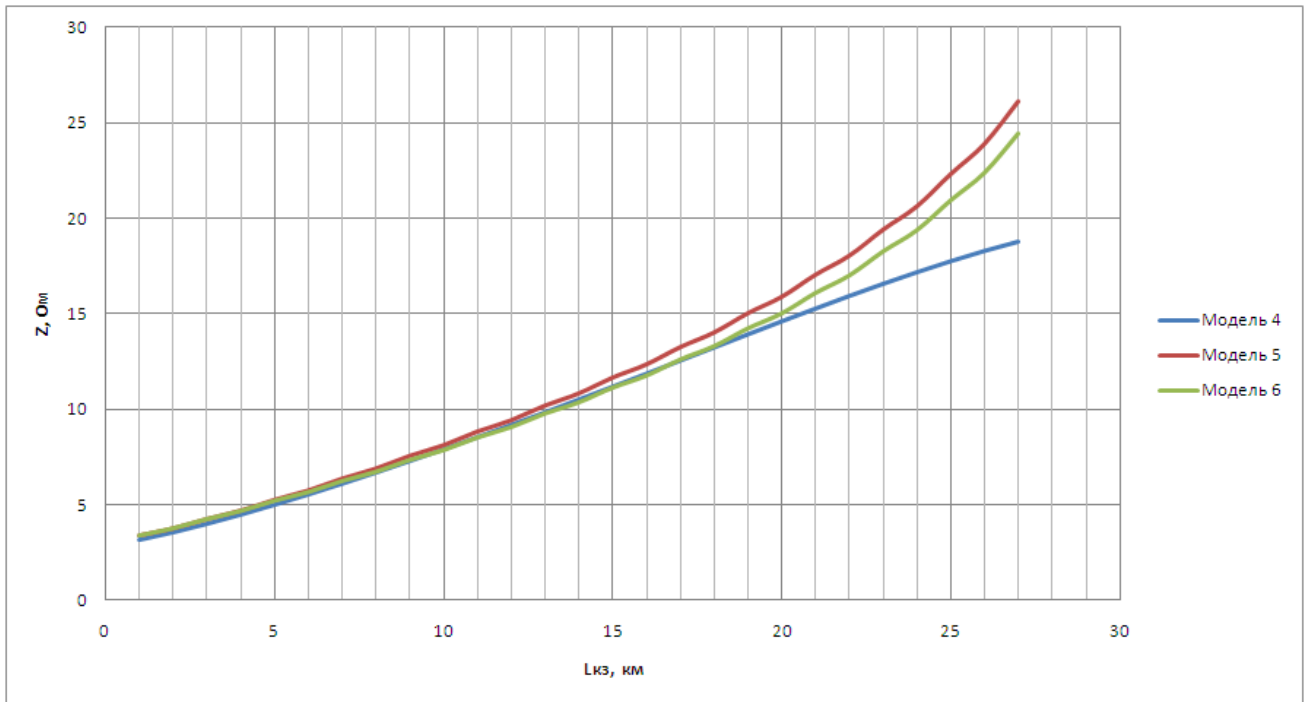
П1.16 – Влияние степени детализации модели и удаленности места КЗ на фазовый угол



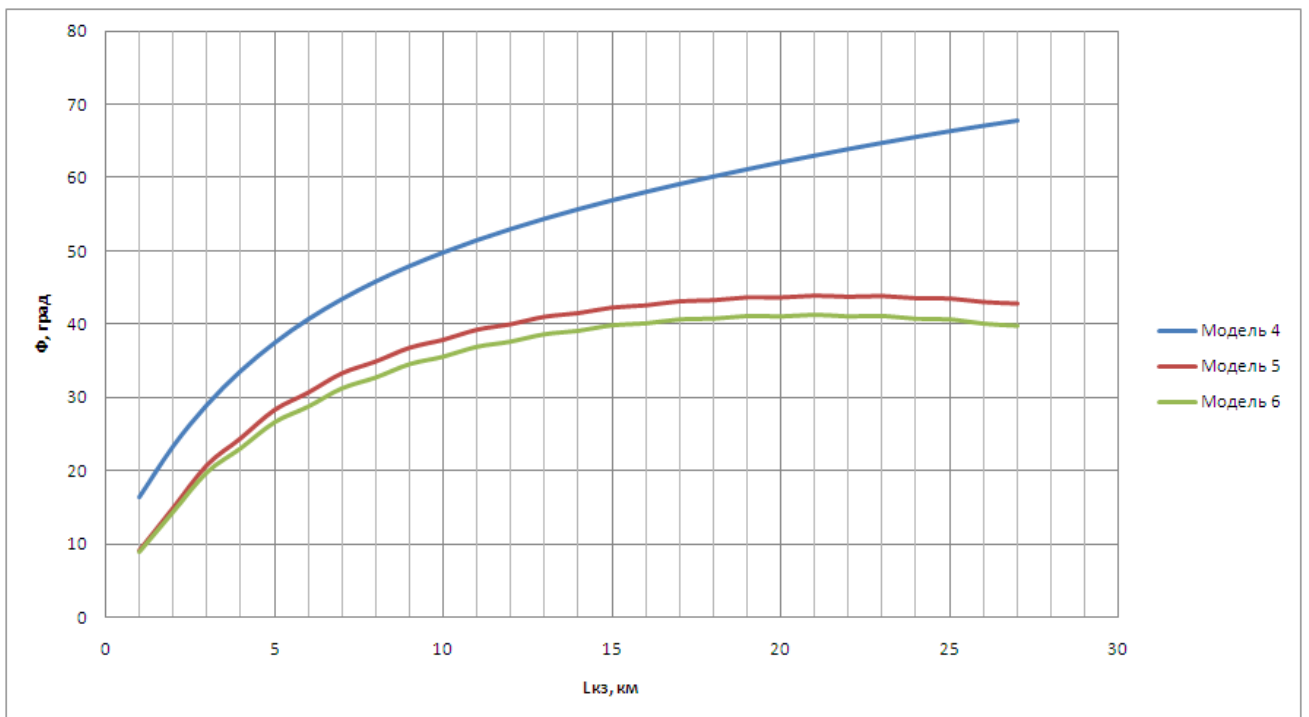
П1.17 – Влияние степени детализации модели на активную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



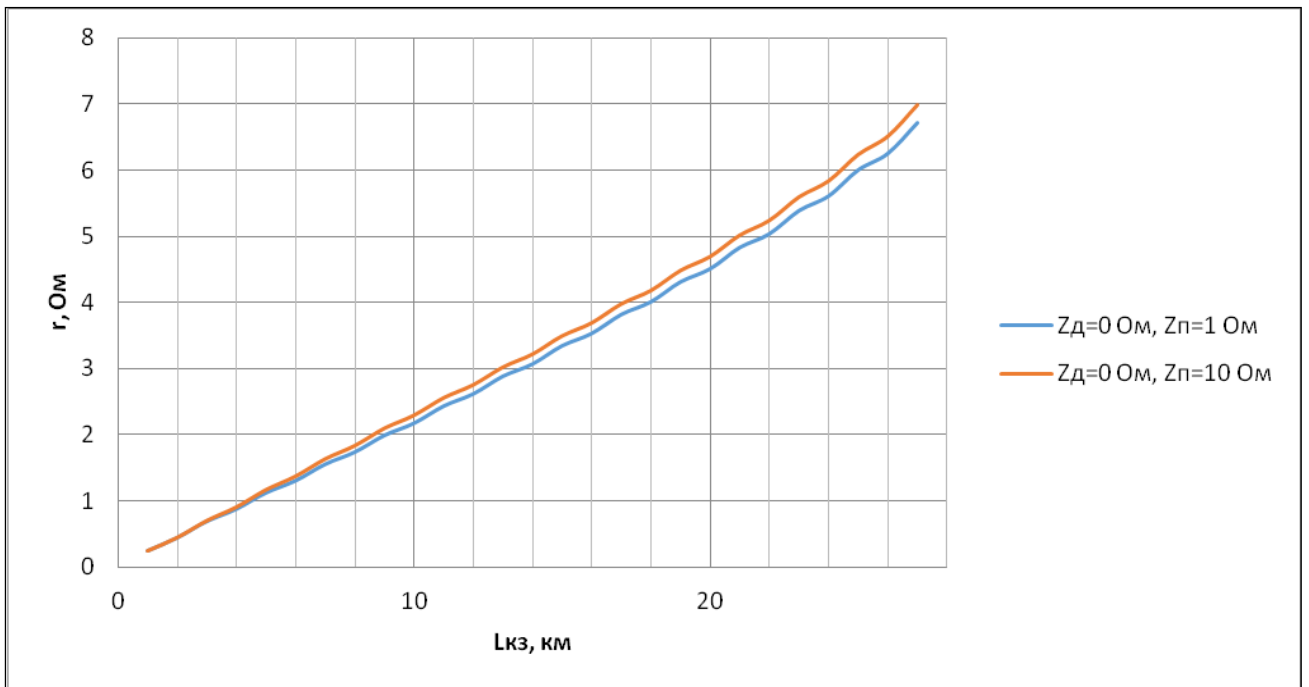
П1.18 – Влияние степени детализации модели на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



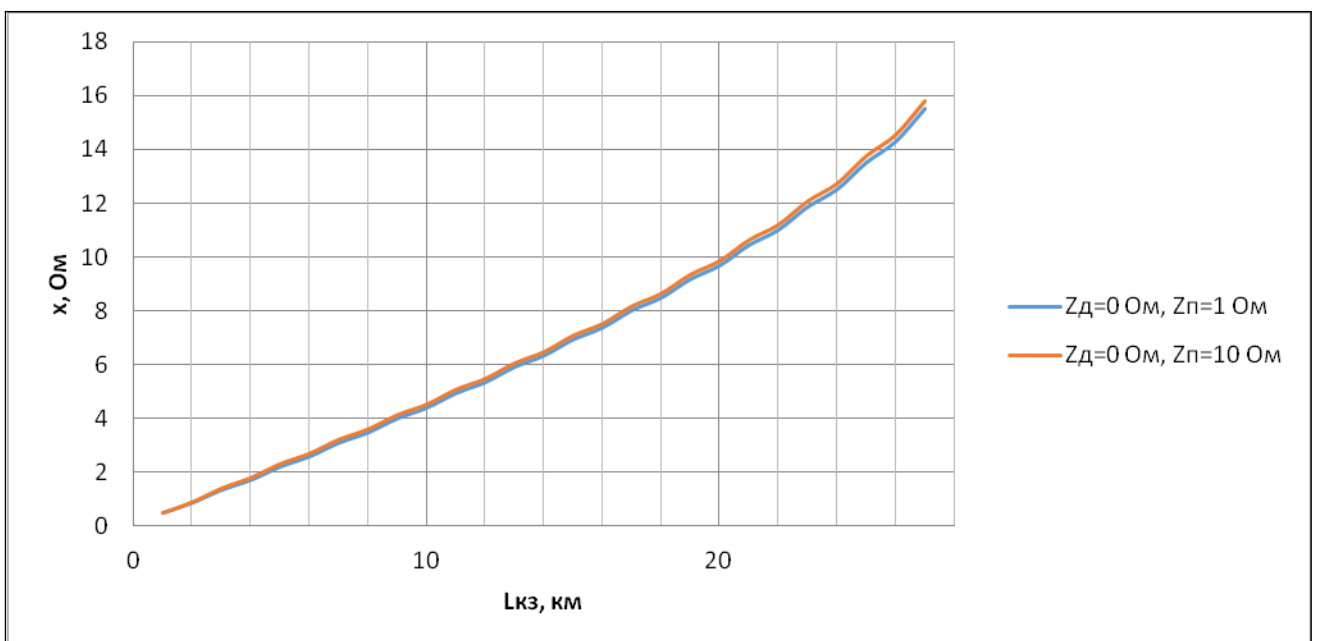
П1.19 – Влияние степени детализации модели на полное сопротивление петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



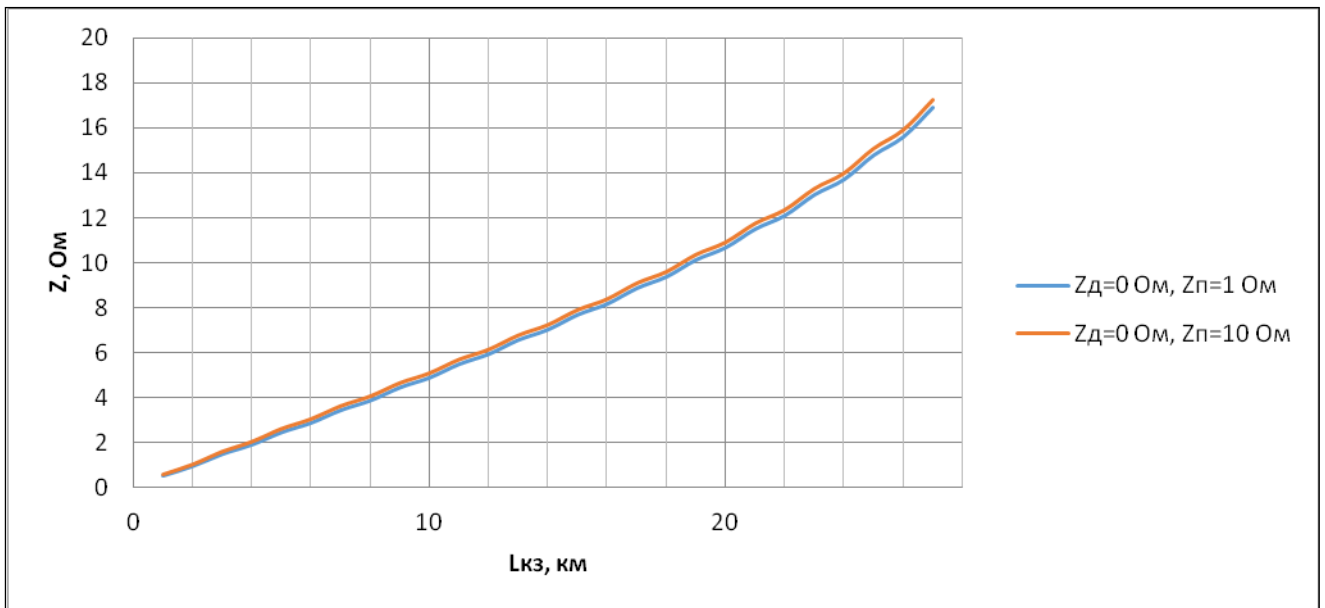
П1.20 – Влияние степени детализации модели на фазовый угол сопротивления петли КЗ при сопротивлении дуги 3 Ом



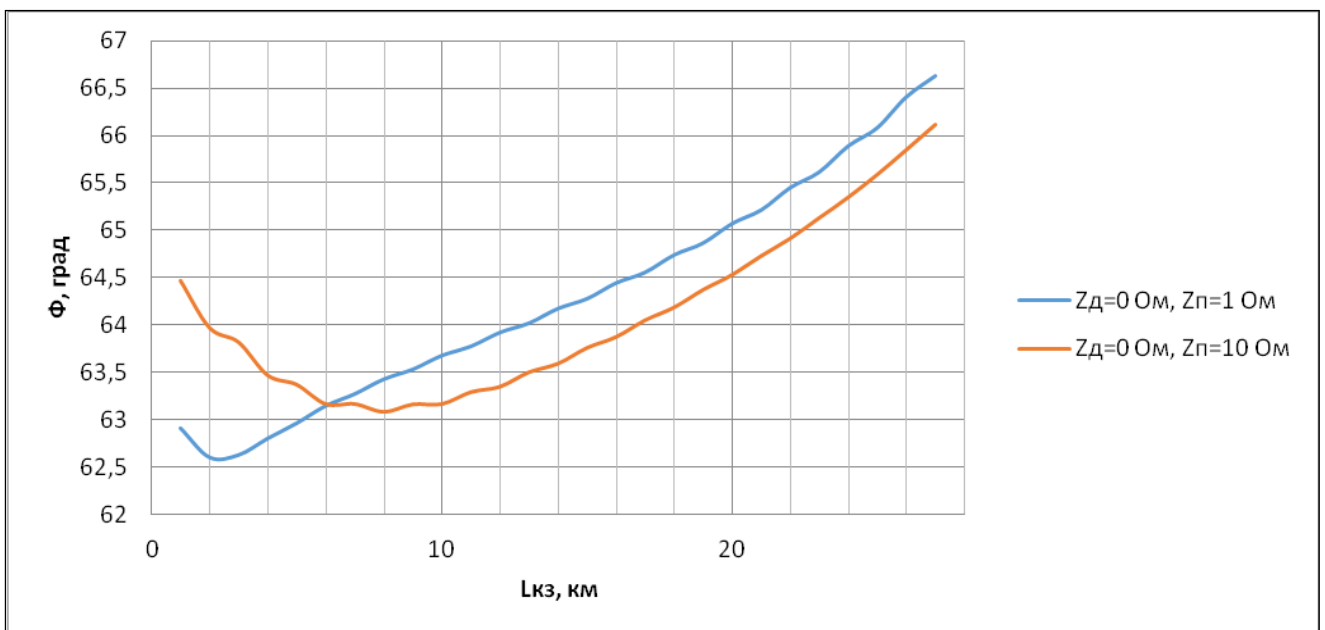
П1.21 – Влияние переходного сопротивления на активную составляющую сопротивления петли КЗ



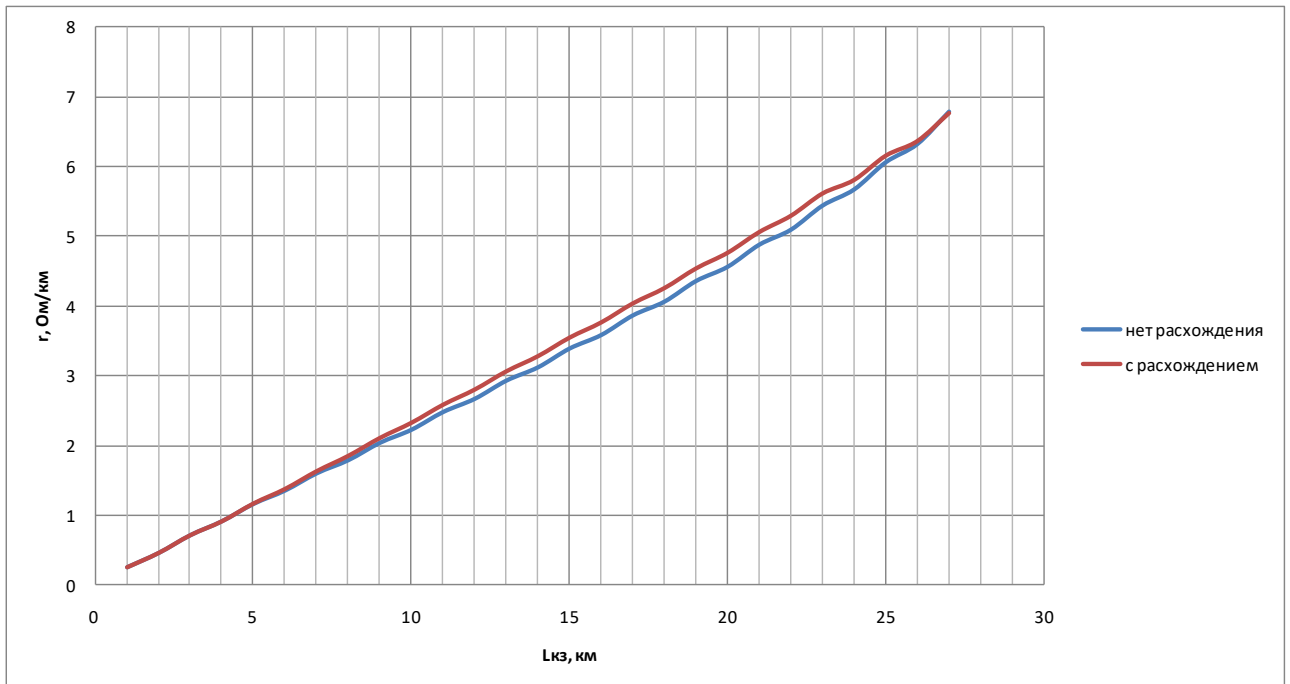
П1.22 – Влияние переходного сопротивления и сопротивления дуги на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ



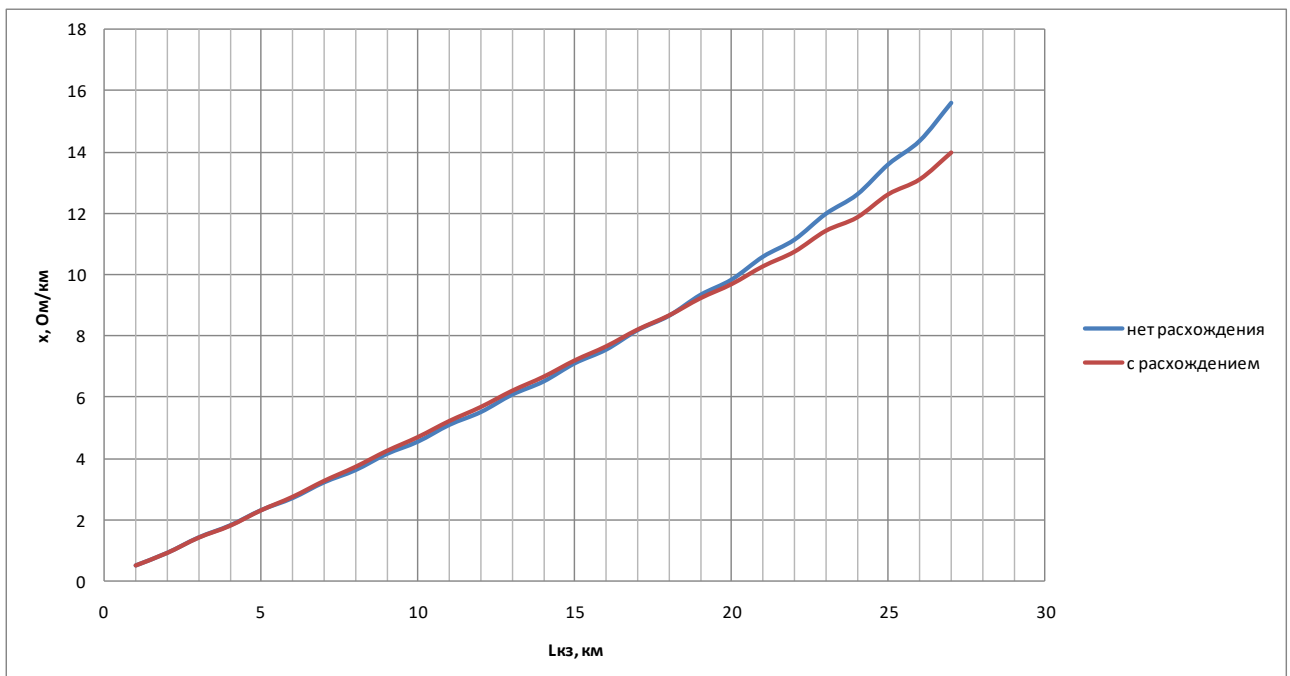
П1.23 – Влияние переходного сопротивления и сопротивления дуги на полное сопротивление петли КЗ



П1.24 – Влияние переходного сопротивления на фазовый угол сопротивления петли КЗ

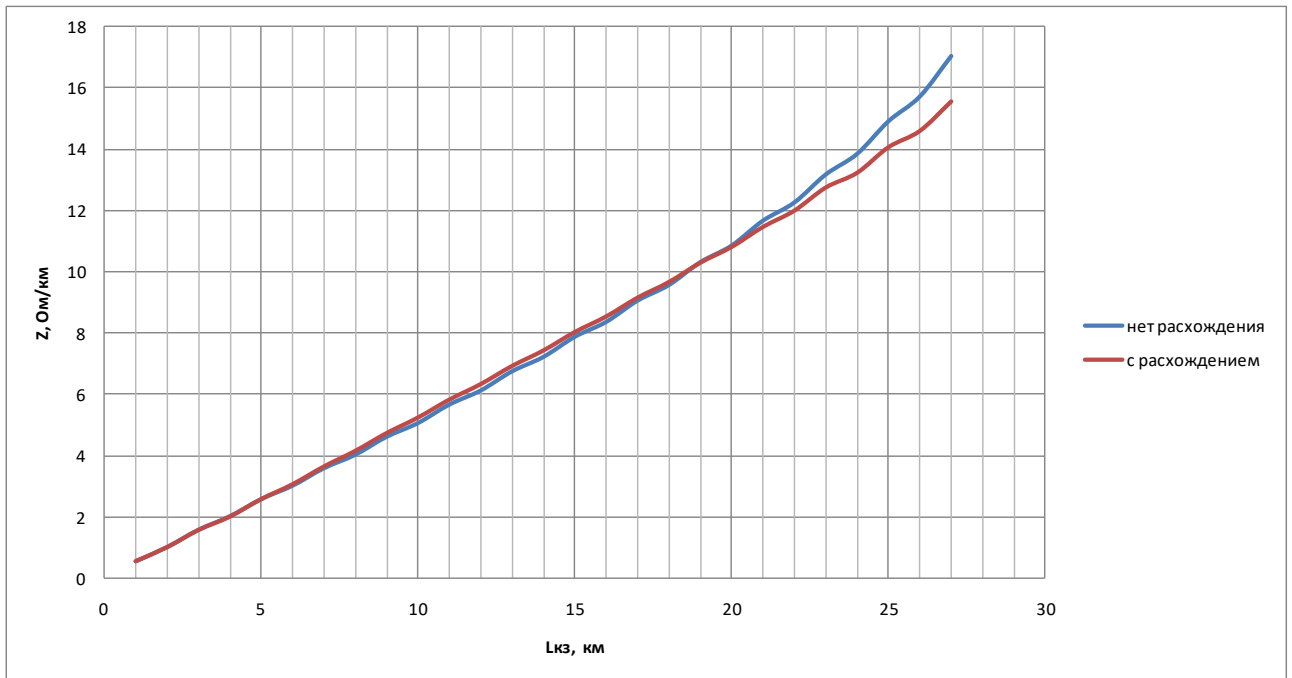


П1.25 – Влияние расхождения путей на активную составляющую сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания

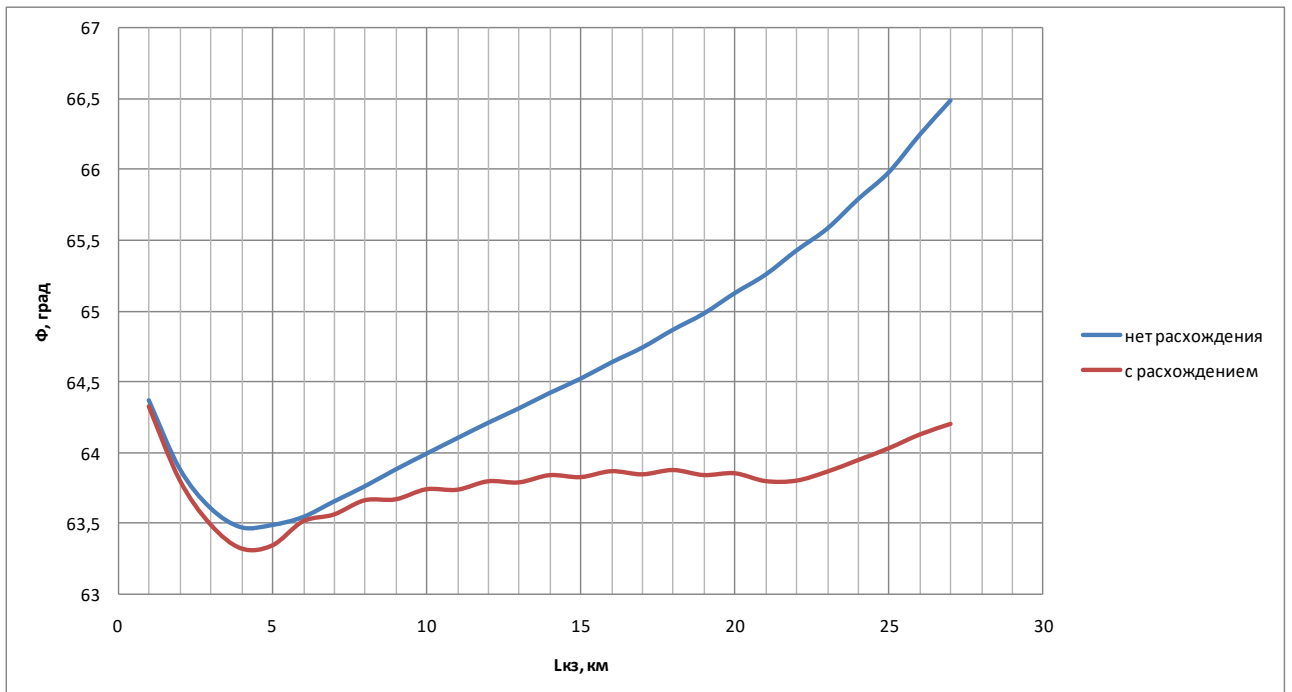


П1.26 – Влияние расхождения путей на индуктивную составляющую сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания

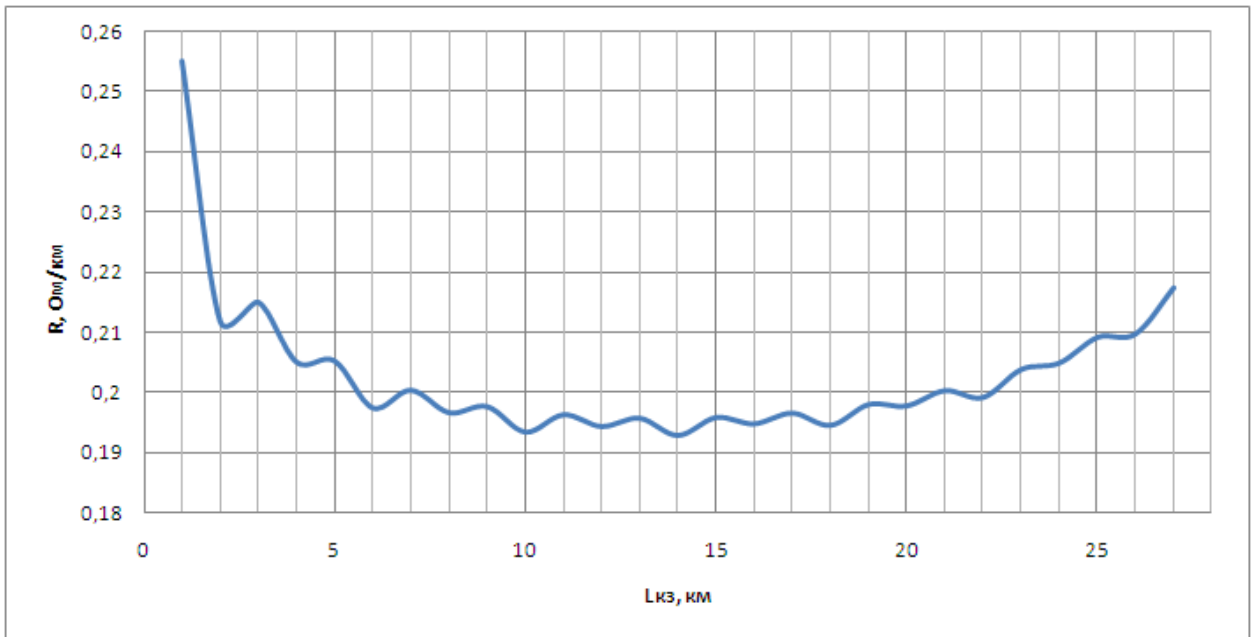




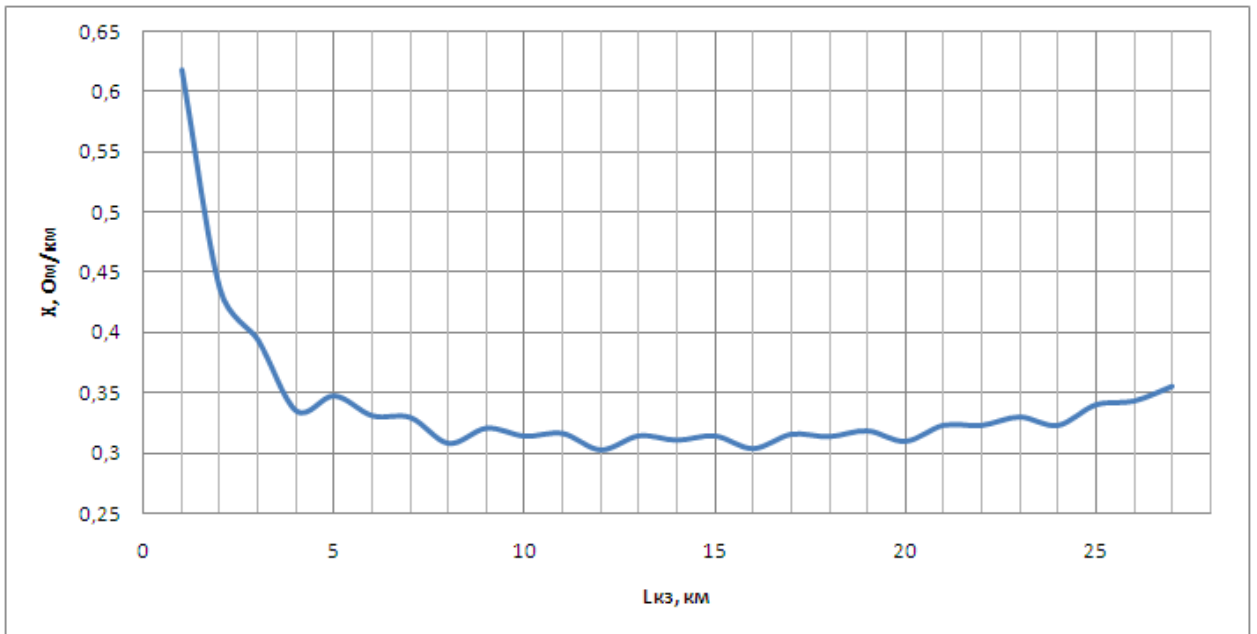
П1.27 – Влияние расхождения путей на полное сопротивление петли КЗ при схеме двустороннего питания



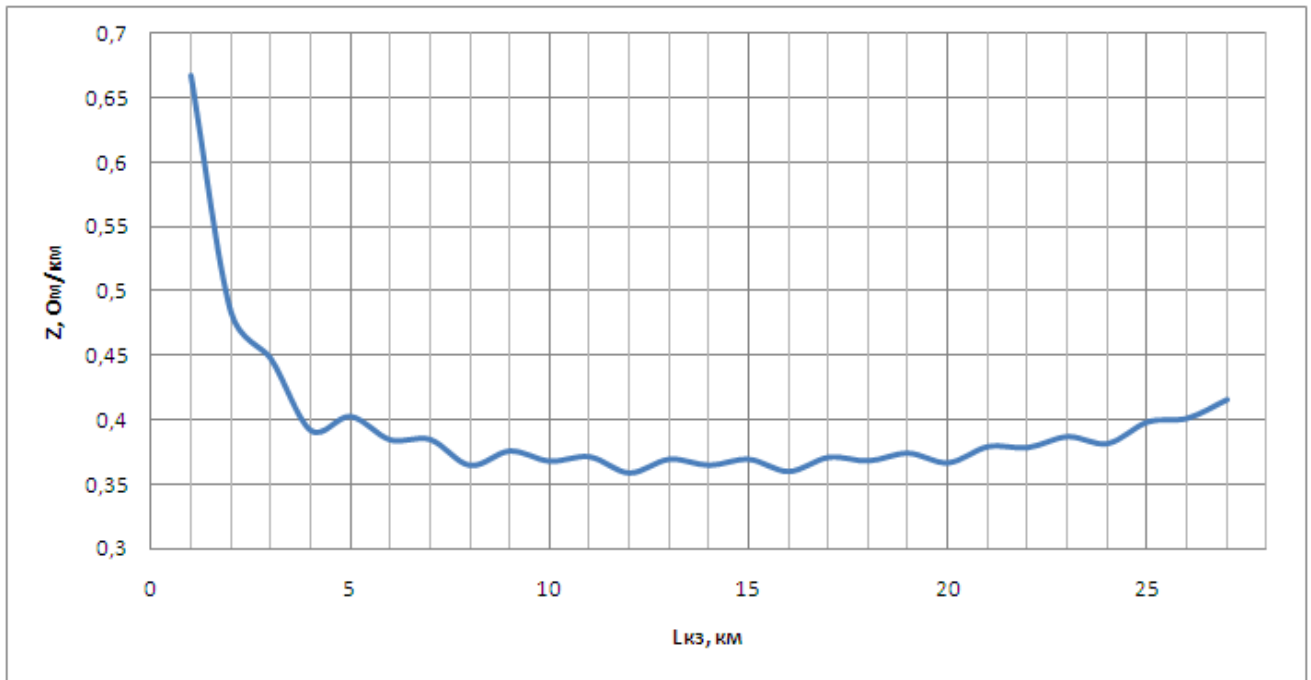
П1.28 – Влияние расхождения путей на фазный угол сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания



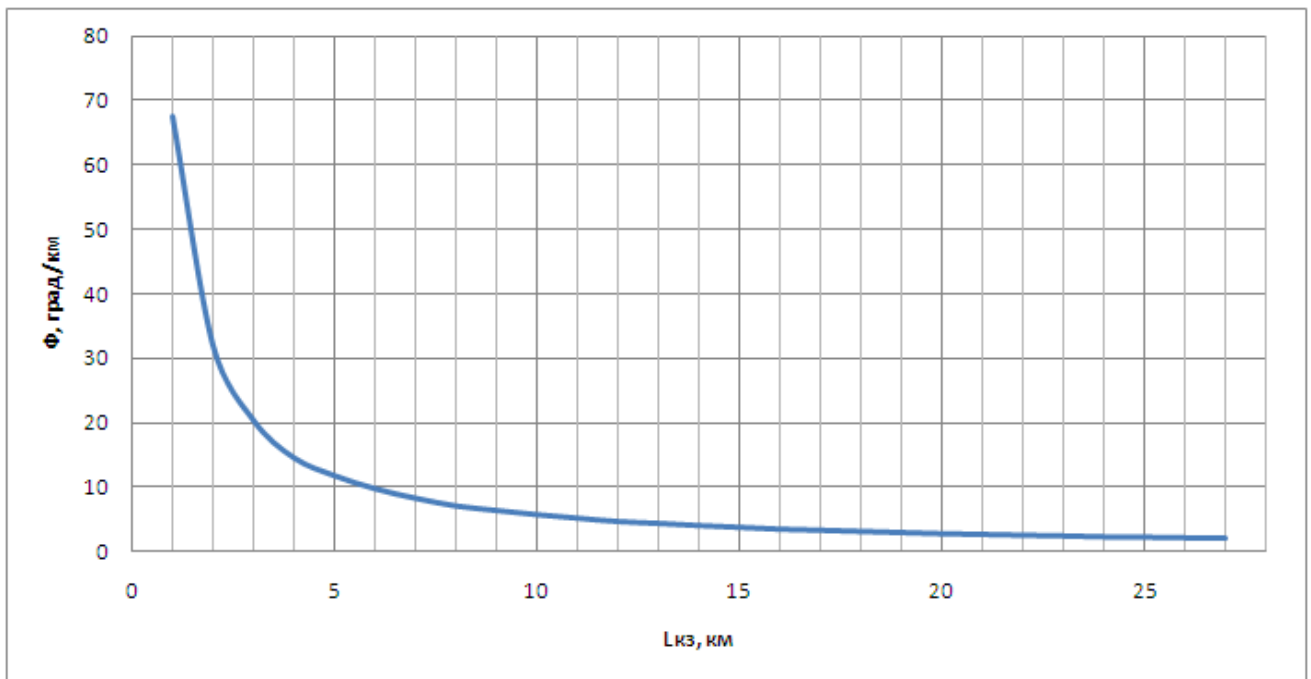
П1.29 – Влияние удаленности места КЗ на активную составляющую удельного сопротивления ТС с ЭУП



П1.30 – Влияние удаленности места КЗ на индуктивную составляющую удельного сопротивления ТС с ЭУП



П1.31 – Влияние удаленности места КЗ на полное удельное сопротивление ТС с ЭУП



П1.32 – Влияние удаленности места КЗ на фазовый угол удельного сопротивления ТС с ЭУП

## **Приложение 2**

Условия и порядок проведения эксперимента на участке  
Старая Станица - Погорелово

1. Короткие замыкания производятся на перегоне Тарасовка – Глубокая на фиксаторах опор:
  - № 242 (998км) – первое КЗ;
  - № 352 (1001 км 3 ПК) – второе КЗ;
  - № 360 (1001 км 5 ПК) – третье КЗ.
2. Сечение переносного заземления – 70 мм<sup>2</sup>.
3. Сезон – весна, погодные условия – t=15°C, пасмурно, без осадков.
4. Работа выполняется по наряду и приказу энергодиспетчера:
  - со снятием напряжения;
  - с применением рабочей площадки АДМ;
  - с опробованием рабочим напряжением;
  - с перерывом движения поездов, в «окно» продолжительностью не менее 2-х часов.
5. Состав исполнителей:
  - электромонтер 5 разряда – 1;
  - электромонтер 4 разряда – 2;
  - электромонтер 3 разряда – 1.

### **Подготовительные работы**

1. ЭЦЦ согласовать день и время проведения замеров токов КЗ, поставить в известность ШЧ, ПЧ о проведении замеров тока КЗ на участке Старая Станица – Погорелово;
2. Заранее организовать «окно» на участке проведения опыта короткого замыкания;
3. Организовать внеочередной обход с осмотром устройств контактной сети, особое внимание уделив заземляющим устройствам;
4. Организовать внеочередную проверку РЗ и автоматики фидеров контактной сети участка Старая Станица – Погорелово, устройств регистрации аварийных режимов.

### **Подготовка рабочего места и допуск к работе**

1. Получить наряд на производство работ и инструктаж от лица, выдавшего наряд.

2. Обеспечить присутствие на участке проведения опыта короткого замыкания бригады ЭЧК в сопровождении АДМ.

3. ЭЦЦ расставить работников ЭЧК на разделах питания к/сети участка замеров токов КЗ, выдать запрещение на въезд и маневры электровозов на воздушные промежутки.

4. ЭЦЦ произвести оперативные переключения для подготовки места работ:

#### 4.1. На ЭЧЭ Старая Станица:

- отключить ВФ-4-27,5;
- отключить линейный разъединитель Ф-4;
- вывести АПВ ВФ-4-27,5.

#### 4.2. На ПС Дяткино:

- отключить ВФ-2-27,5; линейный разъединитель С-2.

5. Получить приказ энергодиспетчера с указанием о снятии напряжения в зоне работы, закрытия пути для движения поездов, времени начала и окончания работ.

6. Провести целевой инструктаж по технике безопасности всем членам бригады с росписью каждого в наряде. Четко распределить обязанности между исполнителями.

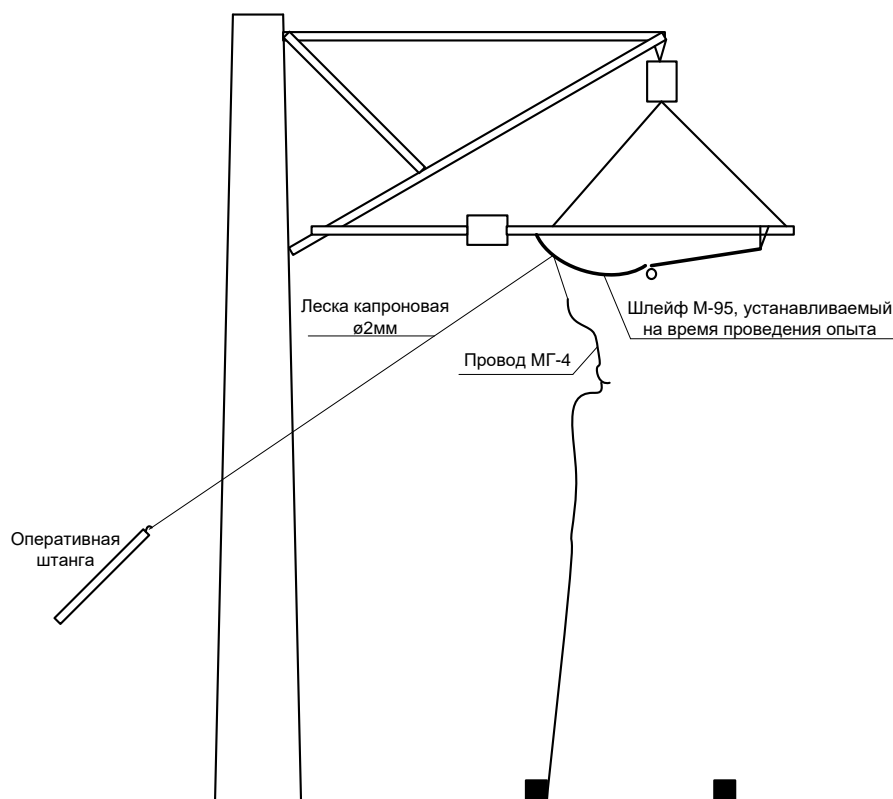
7. Проверив отсутствие напряжения, заземлить провода и оборудование, с которых снято напряжение, переносными заземляющими штангами №1, 2 с обеих сторон места работы в соответствии с нарядом.

8. Подняться на рабочую площадку автомотрисы, поднять и закрепить перила ограждения, привести площадку в рабочее положение;

9. Осуществить допуск бригады к производству работ.

## Производство работ

1. Остановить автомотрису под фиксатором опоры №360 перегона Тарасовка – Глубокая, развернуть рабочую площадку для производства работ;
2. Установить гибкий шлейф из провода М-95 от контактного провода к консоли, сделав небольшую петлю (П2.1);
3. Пропустить в петлю капроновую леску достаточной длины;
4. Гибкий провод МГ-4 соединить с капроновой леской. Второй конец капроновой лески закрепить за оперативную штангу. Второй конец провода МГ-4 закрепить на тяговый рельс;
5. Удалить членов бригады с площадки АДМ, привести площадку в транспортное положение. Автомотрису убрать от места проведения опыта на расстояние 20-25 м;



П2.1 – Схема, поясняющая процесс проведения опыта КЗ

6. Снять заземляющие штанги №1, 2;
7. Предупредить всех находящихся на месте производства работ о подаче

напряжения на место проведения работ, с этого момента считать КС находящейся под напряжением. Удалить присутствующих на безопасное расстояние;

8. ЭЦЦ произвести оперативные переключения для проведения опыта:

- на ЭЧЭ Старая Станица включить линейный разъединитель Ф-4, ВФ-4-27,5;

- на ПС Дяткино включить линейный разъединитель С-2, ВФ-2-27,5.

9. Дежурному персоналу тяговых подстанций, участвующих в эксперименте, наблюдать за токами фидеров КС и работой защит. При наличии тока КЗ и несрабатывании защит через 2 секунды произвести отключение вручную;

10. Член бригады, выполняющий КЗ, должен резко подтянуть капроновую леску за оперативную штангу до хлопка, сопровождающего режим КЗ;

11. ЭЦЦ зафиксировать факт срабатывания защит и регистрации событий, затем произвести оперативные переключения:

- на ЭЧЭ Старая Станица отключить ВФ-4-27,5; ЛР Ф-4;

- на ПС Дяткино отключить ВФ-2-27,5; ЛР С-2.

12. После осуществления повторного допуска и подготовки рабочего места, произвести работы по пунктам 1 – 11 необходимое количество раз у фиксаторов опор №352, 242 перегона Тарасовка – Глубокая;

13. После окончания эксперимента установить заземляющие штанги №1, 2 с обеих сторон от места производства работ. Подъехать автотрисой и произвести демонтаж петли из провода М-95;

14. Собрать материалы, монтажные приспособления, инструмент, защитные средства и погрузить их на автотрису;

15. Привести рабочую площадку АДМ в транспортное положение;

16. Снять заземляющие штанги №1, 2;

17. Возвратить автотрису на станцию установленным порядком;

18. Дать уведомление ЭЦЦ об окончании работ.



**Ответственные**

1. ЭЦС, ЭЦЦ – за предоставление «окна» и оперативную работу;
2. ЭЧК-902, ЭЧК-903 – за расстановку людей на разделах питания участка Старая Станица – Дяткино, за готовность дрезин для объезда к/сети после прохождения тока КЗ, за производство работ;
3. РРУ – за подготовку приборов, регистрацию и обработку измерений;
4. Общее руководство по замеру тока КЗ возложить на ЭЧГ-9.

### **Приложение 3**

Акт о проведении эксперимента и результаты диагностики СДПП



А.А. Скляров

08 апреля 2011 г.

## АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о проведении испытаний на перегоне Тарасовка – Глубокая с замером параметров на тяговой подстанции ЭЧЭ-903 Старая Станица.

Цель испытаний – исследование параметров короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Испытания произведены 08.04.2011г. согласно «Программе замеров токов КЗ в контактной сети на участке Погорелово – Старая Станица» на фиксаторах опор № 242 (998км) – первое КЗ, № 352 (1001 км 3 ПК) – второе КЗ, № 360 (1001 км 5 ПК) – третье КЗ.

В результате испытаний на тяговой подстанции ЭЧЭ-903 Старая Станица получены следующие значения параметров короткого замыкания:

1) Первое КЗ: ток КЗ=1313,25 А, сопротивление  $Z=19,09$  Ом, активное сопротивление  $Z_a=14,70$  Ом, реактивное сопротивление  $Z_p=12,18$  Ом, фазовый угол  $[U < > I]=39,64$  град, время отключения выключателя 10:25;

2) Второе КЗ: ток КЗ=1042,34 А, сопротивление  $Z=24,33$  Ом, активное сопротивление  $Z_a=18,94$  Ом, реактивное сопротивление  $Z_p=15,27$  Ом, фазовый угол  $[U < > I]=38,88$  град, время отключения выключателя 10:51;

3) Третье КЗ: ток КЗ=1056,25 А, сопротивление  $Z=24,18$  Ом, активное сопротивление  $Z_a=18,52$  Ом, реактивное сопротивление  $Z_p=15,54$  Ом, фазовый угол  $[U < > I]=40,00$  град, время отключения выключателя 11:04.

ДЭЛ

РРУ

к.т.н., доцент

аспирант

*Е.А. Николаев*  
*А.И. Энгель*  
*Т.А. Заруцкая*  
*А.С. Мороз*

Е.А. Николаев

А.И. Энгель

Т.А. Заруцкая

А.С. Мороз

### ПЗ.1 – Результаты диагностики СДПП на ФКС №4 при первом КЗ

**Диагностика СДПП**

Круг | Дополнительная информация по К.З. | Оборудование | Состояние оборудования | Журнал | Настройка | Отчеты | ? | Выход

Аварийный режим с 31.03.2011 по 08.04.2011 | Нормальный режим

Дата/Время	№ ЭЧЗ	Присоединение	Тип АПВ
01.04.2011 12:44:07	901	Фк/с 1	АПВ выведено
01.04.2011 13:08:26	901	Фк/с 2	АПВ выведено
01.04.2011 13:20:45	901	Фк/с 3	АПВ выведено
01.04.2011 13:52:12	901	Фк/с 1	АПВ выведено
03.04.2011 15:55:47	901	ФСЦБ 1	АПВ выведено
07.04.2011 12:33:15	903	Фк/с 4	АПВ успешно
07.04.2011 12:33:38	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 4:58:47	902	Фк/с 3	АПВ успешно
08.04.2011 5:04:01	902	Фк/с 1	АПВ успешно
08.04.2011 5:16:58	902	Фк/с 1	АПВ успешно
08.04.2011 10:25:14	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 10:51:31	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 11:04:47	903	Фк/с 4	АПВ выведено

Тяговая подстанция ЭЧЗ - 903 | Старая Станица

Фк/с 4 | 08.04.2011 10:25:14

**Хронология срабатывания защит**

Тип защиты	Время срабатывания	Время отпадания	АПВ
РТ_МТЗ	10:25:14.6528	10:25:14.8175	До АПВ
Б_ЧЗЭФМ	10:25:14.7314	10:25:14.7634	До АПВ

**Параметры короткого замыкания**

АПВ	Напр(кВ)	ТОК (А)	Сопр. Z(0м)	Актив Zа(0м)	Реакт Zр(0м)	(U<>I)град
До АПВ	U 25,07	I 1 313,25	Z 19,09	14,70	12,18	39,64
После ОТКЛ до АПВ	U 27,08	I 0,00	Z 0,00	0,00	0,00	0,0

**АПВ ВЫВЕДЕНО**

Время отключения выключателя до АПВ 10:25:14.7602

Полное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0.107

Собственное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0.029

Пуск | Diagnostic | XnView - [Обзор - C:\,]... | 15:24

## П3.2 – Результаты диагностики СДПП на ФКС №4 при втором КЗ

Диагностика СДПП

Круг    Дополнительная информация по К.З.    Оборудование    Состояние оборудования    Журнал    Настройка    Отчеты    ?    Выход

Аварийный режим с 31.03.2011 по 08.04.2011    Нормальный режим

Дата/Время	№ ЭЧЗ	Присоединение	Тип АПВ
01.04.2011 12:44:07	901	Фк/с 1	АПВ выведено
01.04.2011 13:08:26	901	Фк/с 2	АПВ выведено
01.04.2011 13:20:45	901	Фк/с 3	АПВ выведено
01.04.2011 13:52:12	901	Фк/с 1	АПВ выведено
03.04.2011 15:55:47	901	ФЦБ 1	АПВ выведено
07.04.2011 12:33:15	903	Фк/с 4	АПВ успешное
07.04.2011 12:33:38	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 4:58:47	902	Фк/с 3	АПВ успешное
08.04.2011 5:04:01	902	Фк/с 1	АПВ успешное
08.04.2011 5:16:58	902	Фк/с 1	АПВ успешное
08.04.2011 10:25:14	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 10:51:31	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 11:04:47	903	Фк/с 4	АПВ выведено

Тяговая подстанция ЭЧЗ - 903 Старая Станица

Фк/с 4    08.04.2011 10:51:31

**Хронология срабатывания защит**

Тип защиты	Время срабатывания	Время отпадания	АПВ
РТ_МТЗ	10:51:31.9577	10:51:32.1514	До АПВ
Б_УЗЗФМ	10:51:32.0663	10:51:32.0691	До АПВ
Б_УЗЗФМ	10:51:32.0742	10:51:32.1075	До АПВ

**Параметры короткого замыкания**

АПВ	Напр(кВ)	ТОК (А)	Сопр.Z(Ом)	Актив Za(Ом)	Реакт Zp(Ом)	(U<>)град
До АПВ	U 25,36	I 1 042,34	Z 24,33	18,94	15,27	38,88
После ОТКЛ до АПВ	U 27,36	I 0,00	Z 0,00	0,00	0,00	0,0

**АПВ ВЫВЕДЕНО**

Время отключения выключателя до АПВ 10:51:32.1025

Полное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0,145

Собственное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0,036

Пуск    Diagnostic    XnView - [Обзор - С:\...]...    15:24

### П3.3 – Результаты диагностики СДПП на ФКС №4 при третьем КЗ

**Диагностика СДПП**  
 Круг    Дополнительная информация по К.З.    Оборудование    Состояние оборудования    Журнал    Настройка    Отчеты    ?    Выход

Аварийный режим с 31.03.2011 по 08.04.2011    Нормальный режим

Дата/Время	№ ЭЧЗ	Присоединение	Тип АПВ
01.04.2011 12:44:07	901	Фк/с 1	АПВ выведено
01.04.2011 13:08:26	901	Фк/с 2	АПВ выведено
01.04.2011 13:20:45	901	Фк/с 3	АПВ выведено
01.04.2011 13:52:12	901	Фк/с 1	АПВ выведено
03.04.2011 15:55:47	901	ФСЦБ 1	АПВ выведено
07.04.2011 12:33:15	903	Фк/с 4	АПВ успешное
07.04.2011 12:33:38	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 4:58:47	902	Фк/с 3	АПВ успешное
08.04.2011 5:04:01	902	Фк/с 1	АПВ успешное
08.04.2011 5:16:58	902	Фк/с 1	АПВ успешное
08.04.2011 10:25:14	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 10:51:31	903	Фк/с 4	АПВ выведено
08.04.2011 11:04:47	903	Фк/с 4	АПВ выведено

Тяговая подстанция ЭЧЗ - 903 | Старая Станица

Фк/с 4    08.04.2011 11:04:47

**Хронология срабатывания защит**

Тип защиты	Время срабатывания	Время отпадания	АПВ
РТ_МТЗ	11:04:47.0587	11:04:47.2747	До АПВ
Б_УЭЗФМ	11:04:47.1897	11:04:47.1926	До АПВ
Б_УЭЗФМ	11:04:47.1974	11:04:47.2296	До АПВ

**Параметры короткого замыкания**

АПВ	Напр(кВ)	ТОК (А)	Сопр.Z(Ом)	Актив Za(Ом)	Реакт Zp(Ом)	(U<I)град
До АПВ	U 25,54	I 1 056,25	Z 24,18	18,52	15,54	40,00
После ОТКЛ до АПВ	U 27,74	I 0,00	Z 0,00	0,00	0,00	0,0

**АПВ ВЫВЕДЕНО**

Время отключения выключателя до АПВ 11:04:47.2336

Полное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0,175

Собственное время отключения выключателя до АПВ (сек) 0,044

Пуск    Diagnostic    XnView - [Обзор - C:\...]...    15:25

**Приложение 4**  
Документы патента



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2566458

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТА

Патентообладатель(ли): *Муратова-Милехина Анна Сергеевна (RU), Быкадоров Александр Леонович (RU), Заруцкая Татьяна Алексеевна (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014106435

Приоритет изобретения 20 февраля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 28 сентября 2015 г.

Срок действия патента истекает 20 февраля 2034 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





**Приложение 5**  
Акт внедрения

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

г. Ростов-на-Дону

« 15 » июля 2019 г.

Разработанное Муратовой-Милехиной А.С. (ФГБОУ ВО РГУПС) алгоритмическое обеспечение «Определения места повреждения в тяговой сети переменного тока с учетом неоднородности (метод «С»))» рекомендовано для включения в АРМ энергодиспетчера для использования на ЭЦЦ-Ростов.

Начальник Северо-Кавказской дирекции  
по энергообеспечению – структурного подразделения  
«Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД»



В.И.Карпенко

