

На правах рукописи



Иванова Елена Алексеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе
«Научно-технический центр Единой энергетической системы» (ОАО «НТЦ ЕЭС»)

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Лозина Наталья Георгиевна

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
ректор ФГАОУ ДПО «Петербургский
энергетический институт повышения
квалификации»
Назарычев Александр Николаевич

Кандидат технических наук,
заместитель начальника Службы
электрических режимов
Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада
Вессарт Василий Владимирович

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»

Защита диссертации состоится «31» марта 2017 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент



Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

При эксплуатации линий электропередачи (ЛЭП) всегда имеют место повреждения, наиболее частым и опасным видом которых оказывается короткое замыкание (к.з.) ЛЭП. Аварийные отключения являются причиной дополнительных затрат, приводят к перерывам электроснабжения потребителей.

С целью сокращения времени ликвидации повреждений на ЛЭП в настоящее время используют различные средства и устройства определения места короткого замыкания (ОМКЗ). Усиление конкуренции на рынке электроэнергетики и желание предоставить более качественные услуги потребителю, имеющему все более чувствительные нагрузки, определяют важную задачу разработки быстрого и точного устройства ОМКЗ.

Отечественные разработки для решения задачи ОМКЗ на линиях постоянного тока на сегодняшний день отсутствуют. В то же время Единая Энергетическая Система (ЕЭС) России обладает рядом особенностей функционирования, которые обуславливают актуальность и своевременность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для отечественной электроэнергетики (удаленность объектов генерации от потребителей, проблема подключения возобновляемых источников энергии к ЕЭС и к локальным энергосистемам и пр.). Применение технологий ПТ и эксплуатация протяженных линий ПТ требует использования методов и технических средств ОМКЗ. Применяемые в зарубежной практике волновые методы ОМКЗ на линии ПТ в большинстве своем являются двусторонними и не всегда позволяют точно рассчитать расстояние до места замыкания (например, в случае возникновения близкого замыкания). Кроме того, такие устройства ОМКЗ на линиях ПТ оказываются дорогостоящими, требуют высокой частоты дискретизации исследуемого сигнала и установки дополнительного сложного оборудования, позволяющего фиксировать волны, приходящие от места к.з. на концевые подстанции.

Применение технологий ППТ оказывается обоснованным в том числе в случае электроснабжения потребителей, связанного с преодолением водных преград. При этом в мировой практике, прежде всего, находят применение кабельные линии ПТ. Однако, удельная стоимость кабельной линии, как правило, в несколько раз превышает удельную стоимость воздушной линии. Поэтому после пересечения водной преграды нередко кабельные участки ППТ дополняются воздушными участками. В мировой практике отсутствуют устройства определения места короткого замыкания (ОМКЗ) широкого производства для кабельно-воздушных линий.

Выпускаемые отечественными и зарубежными предприятиями устройства ОМКЗ для ЛЭП переменного тока не лишены недостатков и обладают

значительными погрешностями вычисления расстояния до места возникновения повреждения. Большинство широко применяемых в настоящее время типов дистанционных устройств определения места к.з., основанных на измерении аварийных сигналов основной частоты, на ЛЭП переменного тока из-за погрешностей, как правило, могут указать только возможную зону обхода поврежденной линии электропередачи. Так, если зона обхода составляет $\pm 2\%$ от длины ВЛ, то только в 19% случаев повреждение окажется в зоне, в 92,3% повреждение окажется в зоне $\pm 15\%$ от длины ВЛ. Основной вклад в погрешности устройств ОМКЗ вносит в том числе неизвестное переходное сопротивление R_{Π} в месте к.з.

Снижение погрешности установленных в отечественной энергосистеме устройств ОМКЗ остается важной оперативной задачей.

Цель и задачи диссертации

Целью работы является совершенствование дистанционных методов и устройств ОМКЗ при помощи спектрального анализа на линиях электропередачи для снижения погрешности при ОМКЗ и повышения надежности эксплуатации ЛЭП.

В соответствие с указанной целью основные задачи исследований включали:

- разработку алгоритма ОМКЗ на базе спектрального подхода на линии постоянного тока, состоящей из одного участка с учетом установки по концам линии сглаживающих реакторов и фильтров высших гармоник;
- разработку алгоритма ОМКЗ на базе спектрального подхода на линии постоянного тока, состоящей из кабельного и воздушного участков, с учетом установки по концам линии сглаживающих реакторов и фильтров высших гармоник;
- разработку комбинированного алгоритма ОМКЗ на ВЛ переменного тока, позволяющего использовать спектральный анализ переходного процесса совместно с существующими дистанционными методами ОМКЗ;
- разработку математических моделей для исследования установившихся и аварийных режимов в линиях постоянного тока с учетом наличия кабельного и воздушного участков, переходного сопротивления в месте к.з., концевых устройств линии ПТ с учетом частотных характеристик земли, систем регулирования, защиты и автоматики;
- разработку математических моделей для исследования установившихся и аварийных режимов в линиях переменного тока с учетом переходного сопротивления в месте к.з., логики работы релейной защиты;
- апробацию разработанных алгоритмов ОМКЗ на базе спектрального анализа на разработанном в рамках диссертации макете прибора ОМКЗ.

Достоверность научных положений

Достоверность теоретических результатов обеспечивается строгими аналитическими выводами с использованием основных положений теоретической электротехники и математического анализа. Достоверность компьютерного моделирования обеспечивается использованием апробированного и широко применяемого в научной и инженерной практике программного обеспечения.

Методика исследований

1. Для разработки алгоритма определения расстояния до места замыкания с помощью спектрального анализа на ЛЭП постоянного и переменного тока использовались аналитические методы исследования.

2. Для оценки эффективности предлагаемого спектрального подхода при решении задачи ОМКЗ на ЛЭП постоянного и переменного тока использовались методы математического моделирования.

3. Для апробации предложенных алгоритмов ОМКЗ на ЛЭП был разработан макет прибора ОМКЗ, а также были использованы данные моделирования линий постоянного и переменного тока и данные натурального осциллографирования замыканий на ВЛ переменного тока.

Научная новизна работы

1. Предложен алгоритм ОМКЗ для линии постоянного тока, состоящей из кабельного и воздушного участков.

2. Рекомендуемый спектральный подход при решении задачи ОМКЗ на линии постоянного тока учитывает установку фильтров высших гармоник, включенных в рассечку линейных реакторов по концам линии.

3. Проведена оценка влияния переходного сопротивления R_{Π} в месте к.з. на погрешность разработанного алгоритма ОМКЗ в зависимости от места к.з. на кабельном и воздушном участках линии постоянного тока (в начале, середине или конце участка).

4. Разработан комбинированный алгоритм расчета расстояния до места замыкания в ВЛ переменного тока на базе спектрального анализа и известных дистанционных методов ОМКЗ на базе информации об аварийных токах и напряжениях основной частоты.

5. Проведена оценка влияния переходного сопротивления R_{Π} в месте к.з. на погрешность разработанного алгоритма ОМКЗ в зависимости от места к.з. на ВЛ переменного тока (в начале, середине или конце ВЛ) напряжением 110 кВ, 220 кВ и 330 кВ.

Практическая ценность результатов работы

Предлагаемый алгоритм ОМКЗ на базе спектрального подхода может быть использован в устройстве ОМКЗ для проектируемой кабельно-воздушной линии постоянного тока между подстанциями ЛАЭС-2 и Выборгская и других объектов постоянного тока.

Погрешность предлагаемого алгоритма ОМКЗ на линии постоянного тока составляет до 0,5% - 1% от длины замкнутого участка линии.

Разработаны технические требования к устройству ОМКЗ на базе спектрального подхода с учетом наличия двух участков линии ПТ в проекте по титулу проектирования: «Передача постоянного тока Ленинградская ЛАЭС-2 – Выборгская».

Для ВЛ переменного тока дополнение алгоритмом спектрального анализа приборов ОМКЗ, использующих известные дистанционные методы определения места к.з., позволит повысить точность определения расстояния до места замыкания на линии. Данный подход не требует дополнительных значительных вложений в аппаратную часть системы. Снижение погрешности, возникающей при определении собственной частоты замкнутого контура в спектре аварийного напряжения, достигается путем применения спектрального анализа совместно с известными дистанционными алгоритмами нахождения расстояния до места замыкания на ВЛ переменного тока.

Такой комплексный подход к определению расстояния до замыкания в ВЛ переменного тока позволяет повысить точность результата (до 0,5 % от длины линии при анализе аварийных процессов на модели ВЛ) и обеспечить независимость результата от величины переходного сопротивления и фазового угла между током и напряжением.

Разработанный в рамках диссертации программный код на языке Си в среде Code Composer реализован в контроллере устройства ОМКЗ на ЛЭП и может быть использован в контроллерах других типов в устройствах ОМКЗ как для линий постоянного, так и для линий переменного тока.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- молодежной научной конференции «Студенты и молодые ученые – инновационной России» (Санкт-Петербург, 2013);
- международном электроэнергетическом форуме UPGrid «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (г. Москва, 2013 г.);
- XVIII международной научно-технической и практической конференции «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Энергоэффективность и энергосбережение» (г. Москва, 2014 г.);
- VI международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи-2015» (г. Иваново, 2015 г.);
- II международной конференции по электропередачам постоянного тока высокого напряжения (HVDC-2016), г. Шанхай, октябрь 2016 г.

Публикации

По теме диссертации автором и в соавторстве опубликованы 8 печатных работ, из них 5 работ опубликовано в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для публикации основных научных результатов диссертаций (ВАК); получены патент на полезную модель и патент на изобретение.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (50 наименований). Объем работы включает в себя 156 страниц основного текста, одно приложение, 11 таблиц и 77 рисунков.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся результаты работы, составляющие научную новизну и относящиеся к специальности «Электрические станции и электроэнергетические системы» в части пункта «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок», пункта «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», пункта «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике»:

1. Алгоритм ОМКЗ на базе спектрального анализа на воздушной линии постоянного тока с учетом концевых устройств.
2. Алгоритм ОМКЗ на базе спектрального анализа на кабельно-воздушной линии постоянного тока с учетом концевых устройств.
3. Комбинированный алгоритм решения задачи ОМКЗ на ВЛ переменного тока на базе спектрального анализа и известных дистанционных методов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассмотренных проблем, сформулированы цели и задачи исследований, отражена новизна и практическая ценность результатов работы, приводится информация в части апробации работы и публикаций.

В первой главе приведен обзор существующих методов и средств ОМКЗ на линиях электропередачи постоянного и переменного тока, применяемых в отечественной и зарубежной практике. Приведена оценка погрешности известных устройств ОМКЗ и обозначены причины их возникновения.

Во второй главе поставлена задача разработки алгоритма ОМКЗ на базе спектрального подхода на линии постоянного тока, состоящей как из одного участка (воздушного), так и из нескольких участков с различными погонными параметрами (кабельно-воздушной) с учетом линейного реактора и фильтра высших гармоник (ФВГ) по концам линии ПТ. Актуальность данной задачи стала очевидной при разработке проекта кабельно-воздушной линии ПТ между подстанциями Выборгская и ЛАЭС-2. В отечественной практике устройства ОМКЗ на линии ПТ отсутствуют, а устройства ОМКЗ для воздушных линий,

предлагаемые зарубежными производителями, являются дорогостоящими и требуют установки по концам линии сложного оборудования - дифференцирующих трансформаторов, позволяющих зафиксировать точное время прихода волны от места к.з.

Для решения задачи ОМКЗ в линиях постоянного тока в работе разрабатывается спектральный подход, основанный на анализе кривой напряжения поврежденного полюса и получения спектральной характеристики этой кривой с последующим выделением из нее доминирующей частоты (собственной частоты колебательного контура замкнутого участка линии ПТ).

Использование спектрального подхода для решения задачи ОМКЗ на линии ПТ, состоящей из одного участка, с учетом концевых устройств. Двухчастотные фильтры высших гармоник устанавливаются на каждом полюсе преобразовательной подстанции и подключаются к средней точке линейного реактора. Схема замещения контура разряжающейся через землю линии постоянного тока при к.з. через переходное сопротивление R_{Π} приведена на рисунке 1.

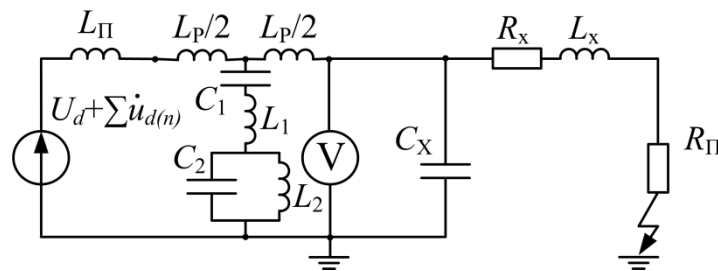


Рисунок 1 - Эквивалентная схема замещения контура линии постоянного тока при к.з. через переходное сопротивление R_{Π} с учетом концевых устройств

В рассматриваемой схеме замещения рисунка 1 измеритель V обозначает место измерения напряжения «полюс-земля», фиксируемого трансформатором напряжения, расположенным в узле примыкания линии, U_d – постоянная составляющая выпрямленного напряжения, $\sum \dot{i}_{d(n)}$ – сумма гармоник выпрямленного напряжения.

Появление в частотном спектре напряжения «полюс-земля» частоты собственных колебаний контура замкнутой линии с максимальной амплитудой свидетельствует о возникновении резонанса напряжения этой частоты в колебательном контуре, изображенном на рисунке 1. Определяется выражение для проводимости контура, изображенного на рисунке 1, в которое входят в том числе, частота переходного процесса в замкнутом контуре, погонные параметры однородного участка линии и искомое расстояние до места повреждения. Из выражения для числителя проводимости эквивалентного контура линии

рассчитывается длина l_x замкнутого участка линии ПТ. Вывод соотношений в этом случае удобнее проводить в операторной форме.

На рисунке 2 приведена схема замещения контура замкнутой на землю через переходное сопротивление линии ПТ:

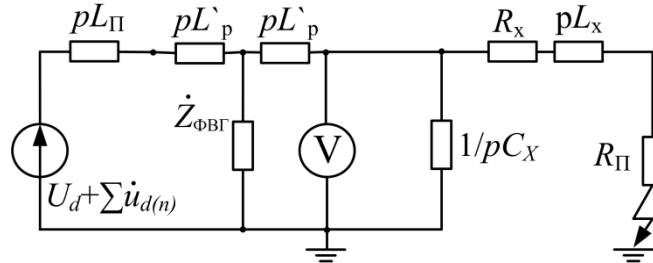


Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения контура линии постоянного тока, состоящей из одного участка, при к.з. через переходное сопротивление R_{Π}

Из рисунка 2 определяется эквивалентная проводимость колебательного контура поврежденной линии постоянного тока с учетом параметров преобразовательной подстанции и концевых устройств линии.

Выражение для числителя проводимости эквивалентного контура, схема которого представлена на рисунке 2, имеет вид:

$$\frac{2}{\pi} \dot{p}_0 C_0 \dot{D} \cdot \left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right) \cdot l_x^2 + \left[\frac{2}{\pi} \dot{p}_0 \cdot (\dot{Y}_{\phi\Pi} L_0 + R_{\Pi} C_0 \dot{D}) + \dot{Y}_{\phi\Pi} R_0 \right] \cdot l_x + \dot{Y}_{\phi\Pi} R_{\Pi} + \dot{D} = 0 \quad (1)$$

Искомое расстояние l_x до места замыкания при этом определяется как вещественная часть корня квадратного уравнения (1):

$$l_x = \operatorname{Re} \left(\frac{-\dot{b} + \sqrt{\dot{b}^2 - 4 \cdot \dot{a} \cdot \dot{c}}}{2 \cdot \dot{a}} \right), \quad (\text{км}) \quad (2)$$

где

$$\dot{a} = \frac{2}{\pi} \dot{p}_0^2 C_0 \dot{D} \cdot \left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right), \quad \dot{b} = \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 \cdot (\dot{Y}_{\phi\Pi} L_0 + R_{\Pi} C_0 \dot{D}) + \dot{Y}_{\phi\Pi} R_0, \quad \dot{c} = \dot{Y}_{\phi\Pi} R_{\Pi} + \dot{D} -$$

комплексные коэффициенты;

$$\dot{p} = -\alpha_0 + j2\pi f_0;$$

f_0 – доминирующая частота переходного процесса, выделенная из спектральной характеристики информативной части напряжения поврежденного полюса ППТ, соответствующая колебательному процессу разряда линии через место повреждения;

$$\dot{D} = 1 + \dot{p}_0 L'_p \dot{Y}_{\phi\Pi};$$

$$\dot{Y}_{\phi\Pi} = \dot{Y}_{\phiВГ} + \dot{Y}_{\Pi};$$

$\dot{Y}_{\phiВГ}$ - операторное выражение проводимости ФВГ на стороне ПТ;

\dot{Y}_{Π} - операторное выражение проводимости преобразователя постоянного тока, учитывающее индуктивность реактора, включенного между преобразователем и ФВГ постоянного тока и эквивалентную индуктивность преобразовательных трансформаторов.

R_{Π} - переходное сопротивление в месте к.з.;

L'_p - индуктивность реактора, включенного между ФВГ на стороне постоянного тока и линией ПТ;

L_0, C_0, R_0 - погонные параметры однородного участка линии в контуре «провод-земля» на частоте f_0 ;

α_0 - коэффициент затухания колебательного процесса разряда линии.

Для определения затухания предлагается прологарифмировать кривую аварийного напряжения. Поскольку затухание сигнала носит экспоненциальный характер, после логарифмирования получаем линейно убывающую функцию от времени вида:

$$u = A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (3)$$

Использование спектрального подхода для решения задачи ОМКЗ на кабельно-воздушной линии ПТ с учетом концевых устройств Для определения расстояния до места повреждения в «смешанной» кабельно-воздушной линии постоянного тока необходимо учитывать неповрежденный участок линии, являющийся промежуточным между подстанцией и участком линии с другими погонными параметрами, на котором произошло к.з. При этом предлагается представить неповрежденный участок линии эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, изображенной на рисунке 3.

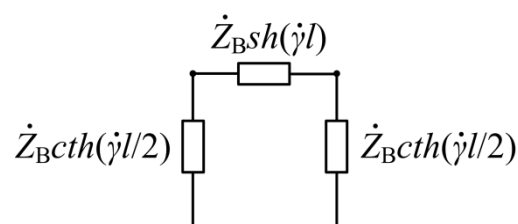


Рисунок 3 - Схема замещения неповрежденного участка при к.з. на линии ПТ, состоящей из двух участков

На рисунке 3 \dot{Z}_B - волновое сопротивление неповрежденного участка линии, l - длина неповрежденного участка линии, $\dot{\gamma}$ - коэффициент распространения волны в неповрежденном участке линии.

$$\dot{Z}_B = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}}; \quad \dot{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)j\omega C_0}, \quad (4)$$

где R_0, L_0, C_0 - погонные параметры неповрежденного участка линии, ω - круговая частота.

Для нахождения расстояния до места замыкания в кабельно-воздушной линии ПТ определяется проводимость контура, изображенного на рисунке 4, в котором неповрежденный участок линии представлен по схеме рисунка 3. На рисунке 4 $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_B \operatorname{cth}\left(\frac{\dot{\gamma}l}{2}\right)$; $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_B \operatorname{sh}(\dot{\gamma}l)$.

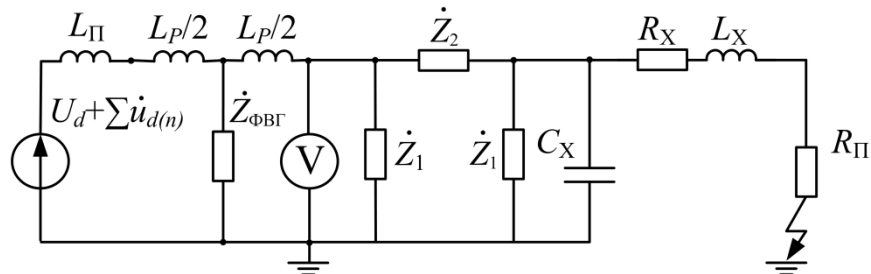


Рисунок 4 - Эквивалентная схема замещения «смешанной» линии ПТ, состоящей из двух участков, при к.з. на втором участке с учетом R_Π

Уравнение относительно длины замкнутого участка l_x в этом случае выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 C_0 \dot{Z}_1 \cdot \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right) \cdot \left(\dot{Z}_2 \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}\dot{F} \right) \right] \cdot l_x^2 + \\ & + \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right) \cdot \left(\dot{Z}_1 \dot{Y}_{\Phi\Pi} \dot{F} + \dot{D}\dot{E} \right) + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 C_0 \dot{Z}_1 R_\Pi \cdot \left(\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}\dot{F} \right) \right] \cdot l_x + \\ & + \dot{F} \cdot \left(\dot{Z}_1 \dot{Y}_{\Phi\Pi} R_\Pi + \dot{D}\dot{Z}_1 \right) + \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}R_\Pi \dot{E} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\dot{E} = 2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2;$$

$$\dot{F} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2$$

Искомое расстояние l_x до места замыкания в этом случае определяется как вещественная часть корня квадратного уравнения (1), в котором:

$$\begin{aligned} \dot{a}' &= \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 C_0 \dot{Z}_1 \cdot \left[\left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right) \cdot \left(\dot{Z}_2 \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}\dot{F} \right) \right], \\ \dot{b}' &= \left(R_0 + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 L_0 \right) \cdot \left(\dot{Z}_1 \dot{Y}_{\Phi\Pi} \dot{F} + \dot{D}\dot{E} \right) + \frac{2}{\pi} \dot{p}_0 C_0 \dot{Z}_1 R_\Pi \cdot \left(\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}\dot{F} \right), \\ \dot{c}' &= \dot{F} \dot{Z}_1 \cdot \left(\dot{Y}_{\Phi\Pi} R_\Pi + \dot{D} \right) + \dot{Y}_{\Phi\Pi} + \dot{D}R_\Pi \dot{E}. \end{aligned} \quad (6)$$

Третья глава посвящена вопросу моделирования кабельно-воздушной линии ПТ для проверки на ней работоспособности разработанного алгоритма ОМКЗ. В качестве прототипа модели кабельно-воздушной линии ПТ рассматривалась проектируемая ППТ ± 300 кВ ЛАЭС-2-Выборгская длиной 108 км (41 км – кабельный участок, 67 км – воздушный участок) и мощностью 1000 МВт. На первом этапе был произведен выбор числа ячеек искусственной линии ПТ. Для

кабельного участка число звеньев составило 41 (длина одного звена $l_{3\text{ КЛ}}=1$ км), для воздушного участка длина звена $l_{3\text{ ВЛ}}$ составила 2,48 км, число звеньев 27. На следующем этапе были определены параметры кабельного и воздушного звеньев и составлены схемы замещения звеньев линии ПТ в соответствии с рисунками 5 и 6.

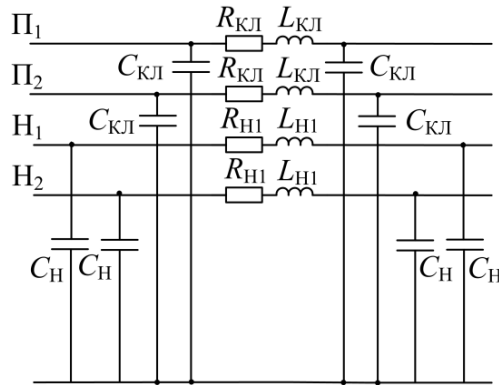


Рисунок 5 - Схема звена кабельного участка линии постоянного тока

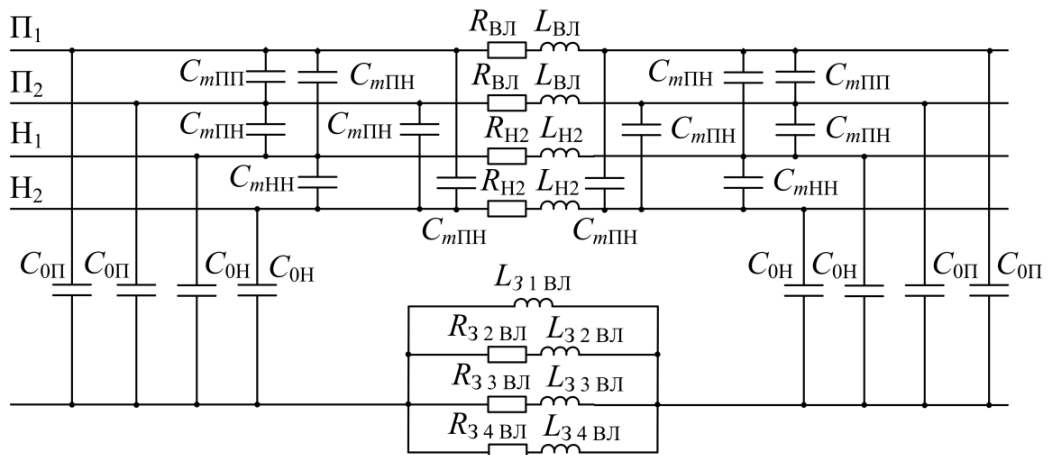


Рисунок 6 - Схема звена воздушного участка линии постоянного тока с учетом частотных характеристик земли

В четвертой главе рассматривается вопрос совместного применения спектрального подхода, разработанного в Главе 2, и известных дистанционных методов ОМКЗ на основе анализа составляющих аварийных сигналов основной частоты с целью повышения точности результата ОМКЗ для высоковольтных линий электропередачи переменного тока 110 кВ и выше. Проведена оценка относительной погрешности алгоритма ОМКЗ на базе спектрального анализа при к.з. на ВЛ 110 кВ, к.з. на ВЛ 220 кВ и к.з. на ВЛ 330 кВ через переходное сопротивление $R_{п}$. В отличие от известных дистанционных методов ОМКЗ, в погрешность которых основной вклад вносит неизвестная величина переходного сопротивления, погрешность спектрального алгоритма, обусловленная наличием переходного сопротивления $R_{п} = 30$ Ом в месте к.з., не превышает 0,3% от длины поврежденного участка для ВЛ 110 кВ и 220 кВ и 0,5% - для ВЛ 330 кВ.

Однако при применении спектрального анализа для решения задачи ОМКЗ на ВЛ переменного тока возникает дополнительная погрешность, связанная с

ошибочным определением собственной частоты в спектре сигнала, которая возрастает с увеличением переходного сопротивления.

Данный вид погрешности вносит основной вклад в ухудшение точностных характеристик метода ОМКЗ на базе спектрального подхода. С целью снижения погрешности, связанной с ошибочным определением собственной частоты колебаний замкнутого контура линии в спектре аварийного напряжения, предлагается накладывать дополнительные ограничения на поиск основного максимума в спектре напряжения поврежденной фазы ЛЭП, которые формируются на базе результатов ОМКЗ, полученных известными импедансными методами.

Значение длины l_{x_0} до места к.з., полученное односторонним дистанционным методом ОМКЗ, принимается в качестве оценки расстояния в первом приближении и позволяет определить диапазон, в котором с помощью спектрального подхода, находится искомое расстояние до места повреждения.

Далее определяются частоты колебаний переходного процесса f_1 и f_2 , соответствующие расстояниям $(l_{x_0} + 0.3l_{x_0})$ и $(l_{x_0} - 0.3l_{x_0})$. При этом максимальная погрешность одностороннего дистанционного метода принята равной $\pm 30\%$.

Частоты f_1 и f_2 собственных колебаний, соответствующие каждому из участков $l_1=1,3 l_{x_0}$ и $l_2=0,7 l_{x_0}$ линии, определяются следующим образом:

$$f_n = \operatorname{Re} \left(\frac{-\dot{b}_{f-n} \pm \sqrt{\dot{b}_{f-n}^2 - 4 \cdot a_{f-n} \cdot c_{f-n}}}{2 \cdot a_{f-n}} \right) \text{ (Гц)}, \quad (7)$$

$$\text{где } a_{f-n} = \left(-\frac{4}{\pi^2} \cdot l_n^2 \cdot L_0 \cdot C_0 \right),$$

$$\dot{b}_{f-n} = \left(j \cdot 2 \cdot l_n^2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot C_0 \cdot L_0 \cdot \alpha_0 + j \cdot l_n^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot r_0 + j \cdot l_n \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot R_{II} \right),$$

$$c_{f-n} = \left(l_n^2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot C_0 \cdot L_0 \cdot \alpha_0^2 + l_n^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot r_0 \cdot \alpha_0 + l_n \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C_0 \cdot R_{II} \cdot \alpha_0 + 1 \right);$$

$n=1,2$;

α_0 – коэффициент затухания колебательного разряда линии;

R_{II} – переходное сопротивление.

Далее в диапазоне частот ($f_1 \dots f_2$) в спектральной характеристике информативной части кривой напряжения выделяется доминирующая частота f_0 , и рассчитывается расстояние до места повреждения по формуле:

$$l_{X_СПЕКТР} = \operatorname{Re} \left(\frac{-\dot{b}'' + \sqrt{\dot{b}''^2 - 4 \cdot \dot{a}'' \cdot c''}}{2 \cdot \dot{a}''} \right) \text{ (км)}, \quad (8)$$

$$\text{где } \dot{a}'' = \left(\frac{4}{\pi^2} \cdot \dot{p}_0^2 \cdot (L_{0Л} + L_3) \cdot C_{0Л} + \frac{2}{\pi} \cdot \dot{p}_0 \cdot C_{0Л} \cdot (r_{0Л} + r_3) \right), \dot{b}'' = \left(\frac{2}{\pi} \cdot \dot{p}_0 \cdot C_{0Л} \cdot R_{П} \right), c = 1$$

$$\dot{p}_0 = -\alpha_0 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0;$$

α_0 – коэффициент затухания колебательного процесса разряда линии, определяется по методу наименьших квадратов.

Описанный алгоритм анализа данных об аварийных токах и напряжениях и последующей оценке расстояния до места повреждения при совместном использовании известных дистанционных методов ОМКЗ и спектрального анализа при к.з. на ВЛ переменного тока приведен на рисунке 7.

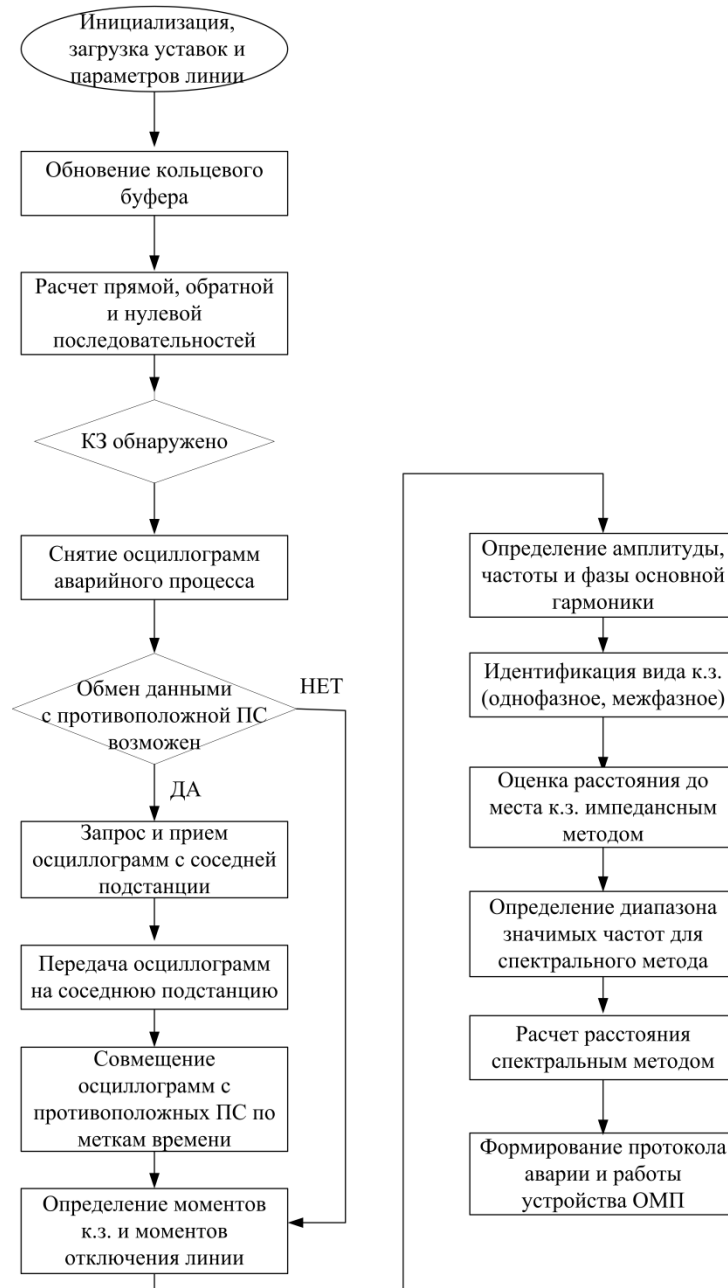


Рисунок 7 - Алгоритм работы устройства ОМКЗ.

Для разработки и исследования спектрального анализа для уточнения результата ОМКЗ на ВЛ переменного тока была разработана модель

высоковольтной линии переменного тока напряжением 330 кВ и длиной 200 км. Каждое звено предложенной модели образуется из трех фаз линии и земли, соединённых между собой емкостными связями, как показано на рисунке 10. Модель воздушного участка представлена 20-ю звеньями (длина каждого звена $l_{зв}=10$ км.).

В модели звена ВЛ, изображенной на рисунке 8, учтены эквивалентные взаимные емкости фазных проводов (C_m), эквивалентные емкости фазных проводов на землю (C_0), индуктивности и активные сопротивления фазных проводов (L_ϕ , R_ϕ), а также эквивалентная индуктивности L_3 и активное сопротивление R_3 земляного провода.

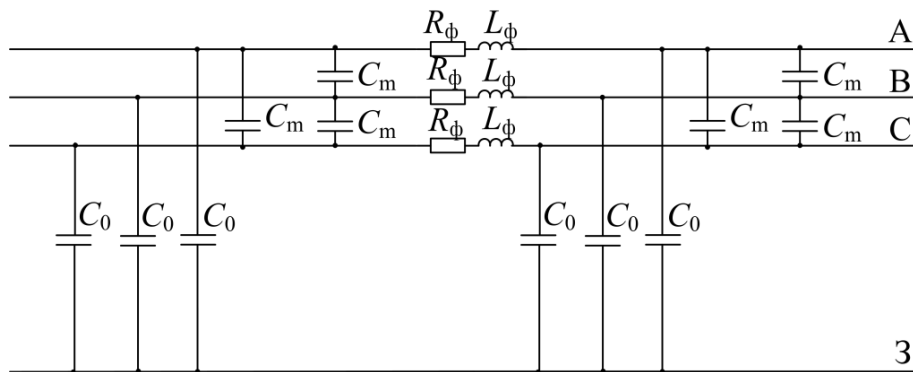


Рисунок 8 - Схема замещения звена ВЛ переменного тока

В пятой главе на разработанной модели линии ПТ в программно-вычислительном комплексе ЕМТР для расчета электромагнитных переходных процессов проводился ряд экспериментов, имитирующих замыкание линии на кабельном или воздушном участке на различном расстоянии от выпрямительной и инверторной подстанций.

Основные результаты проверки работоспособности разработанного алгоритма на цифровой модели кабельно-воздушной линии ПТ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Поврежденный участок линии	Результат ОМКЗ для линии, состоящей из одного участка			Результат ОМКЗ для кабельно-воздушной линии		
	Реальное расстояние от конца линии до места повреждения, км	Найденное расстояние до места повреждения, км	δ , %	Реальное расстояние от конца линии до места повреждения, км	Найденное расстояние до места повреждения, км	δ , %
ВЛ	9,93	10,12	0,46	57,07	57,4	0,78
ВЛ	24,82	24,7	0,29	42,18	41,8	0,95
ВЛ	34,72	34,4	0,45	32,28	31,5	1,16
ВЛ	44,64	44,87	0,34	22,36	23,05	1,03
ВЛ	62	62,3	0,44	5	5,6	0,89
КЛ	6	5,93	0,17	35	35,5	1,22
КЛ	17	17,2	0,49	24	23,85	0,37
КЛ	25	24,8	0,48	16	15,63	0,9
КЛ	33	33,74	0,63	8	7,6	0,98

В работе проведена оценка относительной погрешности предлагаемого метода ОМКЗ, возникающей при неучете в (6) переходного сопротивления R_p в месте к.з. В случае к.з. на воздушном участке линии эта погрешность не превышает 0,25% от длины воздушного участка линии постоянного тока. При к.з. на кабельном участке линии постоянного тока данная погрешность не превышает 0,14%.

На рисунке 9 приведены натурные осциллограммы тока и напряжения поврежденной фазы А, зафиксированные с помощью быстродействующего аварийного регистратора сигналов «Барс» при однофазном к.з. примыкающей к ПС Выборгская ВЛ-473 330 кВ. На основе данной информации был опробован предлагаемый метод ОМКЗ на базе спектрального подхода на ЛЭП переменного тока.

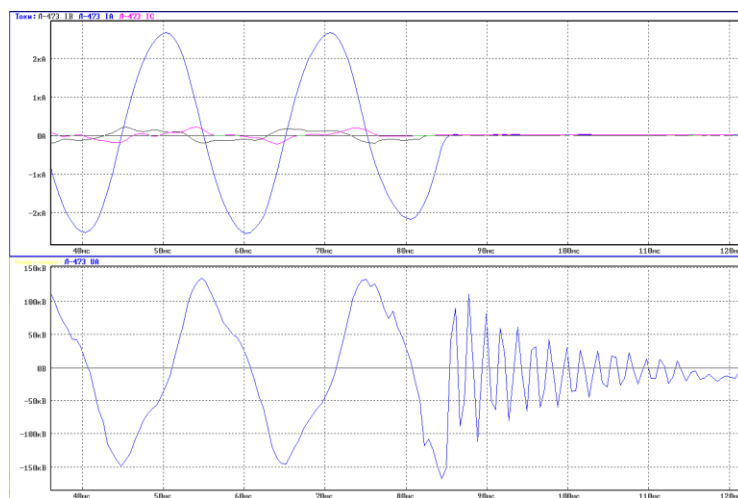
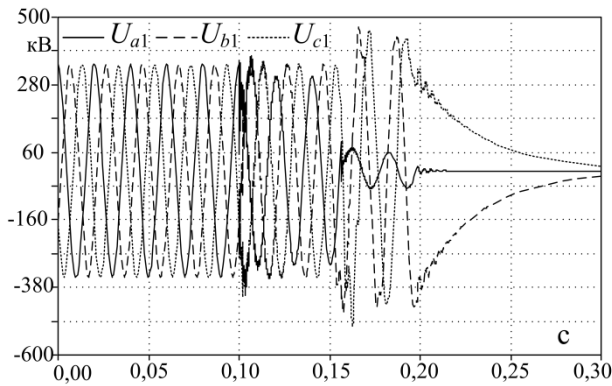


Рисунок 9 - Осциллограмма фазных тока и напряжения при однофазном к.з. ВЛ-473 330 кВ

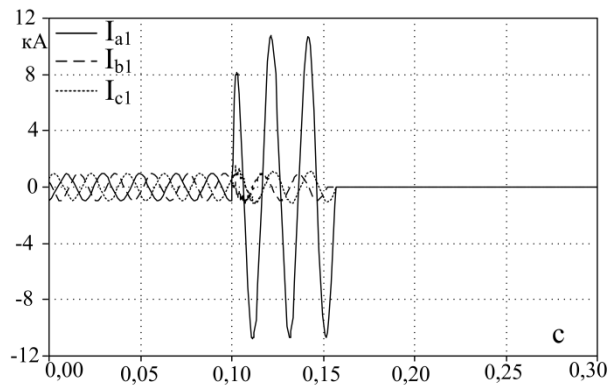
Погонные параметры для этой линии были определены приближенно на основе данных о геометрическом расположении проводов на типовой опоре ВЛ 330 кВ: $C_0=0,01086$ мкФ/км, $L_0=1,045$ мГн/км, $r_0=0,1$ Ом/км. Доминирующая в спектре напряжения поврежденной фазы частота f_0 составляет приблизительно 655 Гц. Несмотря на низкую частоту дискретизации регистратора (1800 Гц), и приближенную оценку значений параметров ЛЭП, расстояние до места повреждения, определенное с помощью предлагаемого алгоритма (115,08 км), оказалось близким к расстоянию, определенному установленными на ПС Выборгская средствами ОМКЗ (110 км); погрешность составила 4,5%.

Для проверки работоспособности разработанного комбинированного метода ОМКЗ на базе спектрального анализа и известных дистанционных методов ОМКЗ на цифровой модели линии переменного тока проводилась имитация различных видов к.з. на разной удаленности от подстанций при различных значениях переходного сопротивления.

Так, при однофазном коротком замыкании фазы А на землю (переходное сопротивление $R_{\Gamma}=30$ Ом, соответствующее сопротивлению заземления опоры ЛЭП) на расстоянии 15 км до точки к.з. кривые аварийных токов и напряжений имеют вид рисунков 10-11.

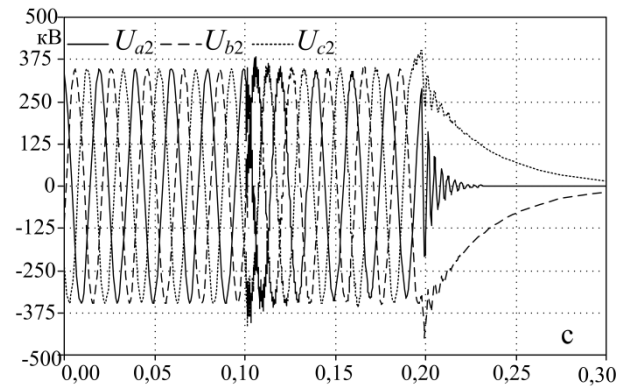


а)

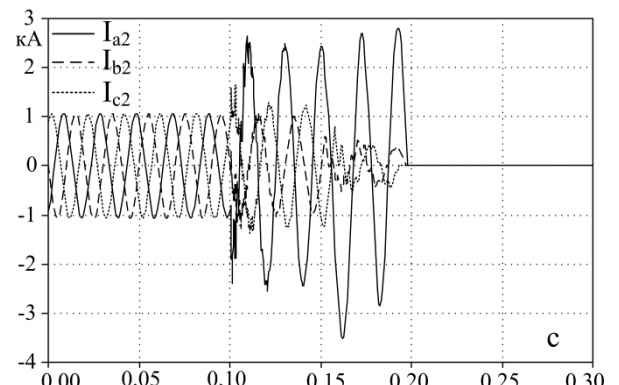


б)

Рисунок 10 - Осциллограммы фазных напряжений (а) и токов (б) линии со стороны ПС1 при однофазном к.з.



а)



б)

Рисунок 11 - Осциллограммы фазных напряжений (а) и токов (б) линии со стороны ПС2 при однофазном к.з.

Расчет расстояния до места повреждения односторонним методом дает результат:

$$l_{x-o} = \frac{3}{2 \cdot X_{1уд} + X_{0уд}} \cdot \frac{|\dot{U}_{1A}|}{|\dot{I}_{1A}|} \cdot \sin \varphi = \frac{1}{0,518} \cdot \frac{305,98 \cdot 10^3}{8,72 \cdot 10^3} \cdot \sin 17^\circ = 19,35 \text{ км},$$

где $X_{1уд}$ — удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности, Ом/км;

$X_{0уд}$ — удельное реактивное сопротивление линии нулевой последовательности, Ом/км;

U_{1A} — напряжение поврежденной фазы А, фиксируемое трансформатором напряжения, расположенным на конце ВЛ со стороны ПС1,

I_{1A} — ток в поврежденной фазе А, фиксируемый трансформатором тока, расположенным на конце ВЛ со стороны ПС1,

φ - угол между током I_{1A} и напряжением U_{1A} .

Погрешность в этом случае составит $\delta=29\%$ от длины замкнутого участка (2,2% от полной длины линии).

Спектр напряжения поврежденной фазы А начиная с момента отключения линии со стороны ПС1 имеет вид рисунка 12. Подстановка доминирующей частоты $f_1=288$ Гц в формулу (8) дает результат $l_{X_СПЕКТР} = 182$ км

Определяем расстояние до места к.з. предлагаемым методом ОМКЗ:

$$l_1=l_{x_O}-0.3*l_{x_O}=13,5 \text{ км}, l_2=l_{x_O}+0.3*l_{x_O}=25,2 \text{ км}$$

При этом диапазон частот в рассматриваемом случае составит 2225...4150 Гц. Доминирующая частота при этом в соответствии с рисунком 13 составит 3862 Гц. Подстановка частоты $f_m=3862$ Гц из значимого диапазона частот в формулу (8) дает результат $l_{X_СПЕКТР} = 14,6$ км

Погрешность в этом случае составит $\delta=2,7\%$ от длины поврежденного участка (0,2% от полной длины линии).

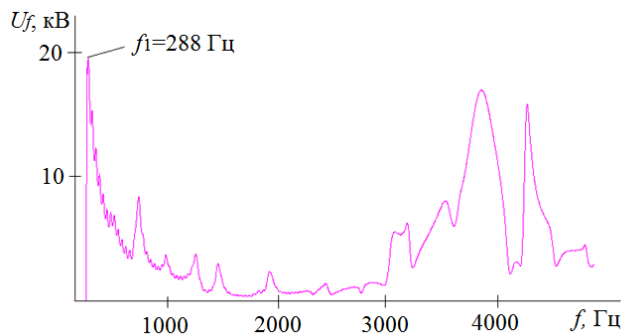


Рисунок 12 - Спектр аварийного напряжения со стороны ПС1

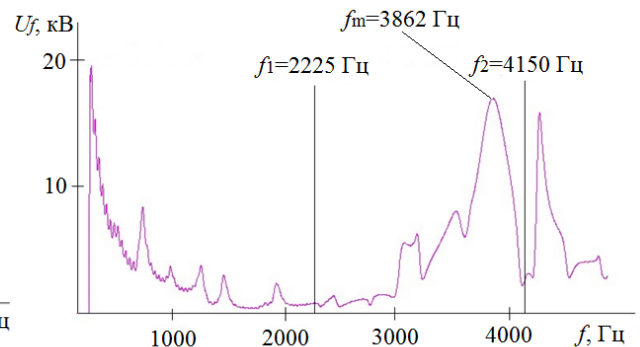


Рисунок 13 - Диапазон значимых частот в спектре аварийного напряжения со стороны ПС1

В пятой главе также описывается разработанный на контроллере типа СРС108 макет прибора ОМКЗ на базе спектрального анализа. На рисунке 14 изображен вид разработанного макета. Физическое моделирование линии электропередачи осуществлялось R, L, C - элементами.

На рисунке 15 приведено фото экрана операторной панели, содержащего результаты обработки информации.



Рисунок 14 - Вид макета прибора
ОМКЗ

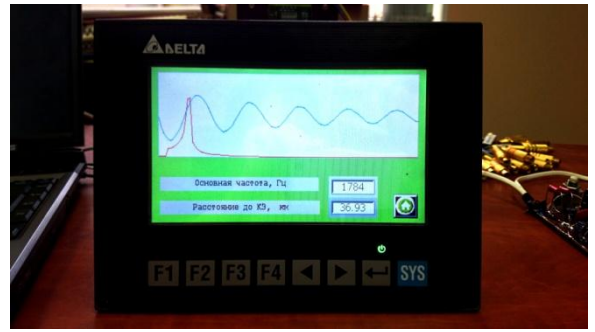


Рисунок 15 - Экран результата расчета
расстояния до места к.з.

В таблице 2 приведены результаты моделирования процесса к.з. на линии и расчета расстояния до места замыкания в линии с погонными параметрами $L_0 = 1,6$ мГн/км, $C_0 = 0,009$ мкФ/км, $R_0 = 0,07$ Ом/км.

Таблица 2

f_0 , Гц	11547	7969	4270	3108	2547	1983	1784
$l_{к.з.}$, км	5,69	8,26	15,43	21,2	25,87	33,22	36,9

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертации разработаны модификации методов ОМКЗ на базе спектрального подхода для линии электропередачи постоянного тока с учетом внешних характеристик и систем регулирования, защиты и автоматики, а также для ВЛ переменного тока с учетом работы РЗ и выключателей.

2. Разработанный алгоритм ОМКЗ на линии постоянного тока, основанный на анализе спектральной характеристики напряжения поврежденного полюса линии, позволяет учитывать наличие концевых устройств на линии ПТ (сглаживающий реактор, фильтры высших гармоник).

3. Разработанный алгоритм ОМКЗ на линии постоянного тока на базе спектрального подхода позволяет учитывать наличие кабельного и воздушного участков в линии постоянного тока.

4. Работоспособность алгоритмов проверена на модели кабельно-воздушной линии ПТ в программно-вычислительном комплексе ЕМТР для расчета электромагнитных переходных процессов.

5. Погрешность предлагаемого алгоритма ОМКЗ, основанного на спектральном подходе, на кабельно-воздушной линии постоянного тока составляет 1% от длины замкнутого участка линии. Погрешность рассмотренного алгоритма для линий постоянного тока, состоящих из одного участка, в большинстве случаев не превышает 0,5 % от длины замкнутого участка линии.

6. Проведена оценка влияния переходного сопротивления R_{Π} в месте к.з. при определении расстояния до места замыкания на кабельно-воздушной линии ПТ. Наличие переходного сопротивления величиной 30 Ом, соответствующей величине сопротивления заземления опоры линии, в месте к.з. обуславливает погрешность алгоритма ОМКЗ на базе спектрального анализа не более 0,25% от длины замкнутого участка линии.

7. Разработан комбинированный алгоритм решения задачи ОМКЗ в линиях переменного тока на базе совместного применения спектрального подхода, основанного на анализе спектральной характеристики напряжения поврежденной (-ых) фазы (фаз) линии, и известных дистанционных методов ОМКЗ.

8. Проведена оценка влияния переходного сопротивления R_{Π} в месте к.з. при определении расстояния до места замыкания на кабельно-воздушной линии ПТ. Наличие переходного сопротивления величиной 30 Ом, соответствующей величине сопротивления заземления опоры линии, в месте к.з. обуславливает погрешность метода ОМКЗ, основанного на спектральном анализе, не более 0,5% от длины замкнутого участка ВЛ переменного тока.

9. Работоспособность метода ОМКЗ, использующего совместно дистанционные методы ОМКЗ и спектральный анализ, проверена на цифровой модели ВЛ переменного тока напряжением 330 кВ, длиной 200 км, а также с использованием данных, полученных из натуральных осциллограмм аварийных процессов на линиях переменного тока 330 кВ, примыкающих к ПС Выборгская.

10. Разработанный комбинированный метод ОМКЗ на ВЛ переменного тока позволяет существенно повысить точность известных дистанционных методов и устройств ОМКЗ, оказывается простым с точки зрения аппаратной реализации и может быть интегрирован в существующие приборы и устройства ОМКЗ.

11. Разработан и изготовлен макет прибора ОМКЗ на базе спектрального подхода на контроллерах СРС108. Практически, разработанный для реализации работы макета программный код на языке Си в среде Code Composer может быть использован как в данном контроллере, так и в других контроллерах как для линий постоянного, так и переменного тока.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Иванова Е.А., Исаев Е.В., Лозинова Н.Г., Мазуров М.И. Определение места повреждения в высоковольтных линиях электропередачи переменного тока на основе двусторонних измерений // Известия НТЦ ЕЭС - №2 (67) – 2012 - Санкт-Петербург, Россия - с. 120 – 131.

2. Иванова Е.А., Исаев Е.В., Лозинова Н.Г. Преимущества определения места повреждения в высоковольтных линиях электропередачи переменного тока на основе двусторонних измерений // Воздушные линии - №2 (11) – 2013 - Москва, Россия - с. 41 – 48.

3. Иванова Е.А., Лозина Н.Г., Мазуров М.И. Определение места повреждения в линии электропередачи постоянного тока на базе спектрального метода // Энерго-Эксперт №5 (46) – 2014 - Москва, Россия - с. 16 – 19.
4. Иванова Е.А. Определение места повреждения в линии электропередачи постоянного тока // Электро - № 6 - декабрь 2014 - Москва, Россия - с. 21 – 25.
5. Иванова Е.А. Определение места повреждения в неоднородной линии электропередачи постоянного тока // Электрические станции - № 7 – 2014 - Москва, Россия - с. 51 – 56.
6. Иванова Е.А. Комбинированный способ определения места повреждения в линии электропередачи переменного тока // Электричество - № 7 - 2015г. - с. 12 – 20.
7. Ivanova E.A. Fault location in a nonuniform DC power transmission line // Power Technology and engineering - vol.48, № 5 – 2015 - p. 400-405.
8. Иванова Е.А., Лозина Н.Г. Особенности определения места повреждения (ОМП) в кабельно-воздушной линии постоянного тока // Известия Томского политехнического университета – Томск, 2016. № 8 – С. 17 – 27.
9. Лозина Н.Г., Мазуров М.И., Исаев Е.В., Иванова Е.А. Устройство для определения места повреждения при коротких замыканиях на линии электропередачи переменного тока – Патент на полезную модель № 132568.
10. Лозина Н.Г., Мазуров М.И., Иванова Е.А. Способ определения места повреждения при коротких замыканиях на линии электропередачи переменного тока – Патент на изобретение № 2498330.