

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование электромагнитной совместимости устройств защиты, автоматики и управления трансформаторной подстанции 110/10 кВ

Студент

Д.В. Малахов
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., А.Н. Черненко
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

Введение	4
1 Основные вопросы обеспечения электромагнитной совместимости	8
1.1 Краткие определения и термины	10
1.2 Источники электромагнитных помех	11
1.3 Классификация электромагнитных помех	13
2 Описание и назначение объекта исследования	16
2.1 Краткая характеристика объекта	16
2.2 Устройства защиты, автоматики и управления	20
2.3 Грозозащита и заземление	27
2.4 НТД в области обеспечения ЭМС на объектах электроэнергетики	31
2.5 Нарушение работы БЭ2505А при отключении аварийного режима ячейки 10 кВ	35
3 Расчетно-аналитическая часть	37
3.1 Замыкания в сетях с изолированной нейтралью, как источники ЭМП	37
3.2 Расчетные схемы замещения	42
3.3 Упрощенная модель механизма передачи энергии электромагнитной помехи (ЭМП) на вторичные и цепи устройства защиты, автоматики и управления	50
3.4 Оценочный расчет заземляющего устройства трансформаторной подстанции 110/10 кВ	61
4 Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости аппаратов защиты, автоматики и управления трансформаторной подстанции 110/10 кВ	65
4.1 Мероприятия для снижения уровня ЭМП	65
4.2 Мероприятия по снижению перенапряжений при грозовом и коммутационном воздействии	67
4.3 Эксперимент по определению уровня ЭМП на вторичных цепях	69
Заключение	73
Список используемых источников	74

Приложение А Принятые сокращения	77
Приложение Б План заземляющего устройства ЗРУ-10 кВ	78
Приложение В Преобразователь интерфейса RS-485 в ТТЛ Д2700	79
Приложение Г Расчет ЭМП в программе EMI analyzer	80

Введение

Широкая научно-техническая задача обеспечения электромагнитной совместимости объектов и субъектов электроэнергетических систем понимается как, обеспечение системы нормально функционировать, обеспечивая транзит и преобразование электроэнергии в условиях мощных электромагнитных воздействий, порождаемых как самой системой электроснабжения (СЭС), так и от сторонних объектов и систем. Современная релейная защита и автоматика повсеместно строится на микропроцессорных терминалах, которые в свою очередь построены на современной микроэлектронной базе [14]. Перечень используемых в работе сокращений приведен в приложении А.

Самым сложным техническим аспектом внедрения цифровых аппаратов защиты, автоматики и управления на современных электрических подстанциях, является необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) с действующей электромагнитной обстановкой (ЭМО) на объекте. Сравнительно низкая помехоустойчивость цифровой техники с одной стороны и недостаточное внимание разработчиков к вопросам обеспечения ЭМС с другой стороны, объясняют остроту проблемы [24].

Как правило, функции защиты, автоматики и управления сосредоточено в одном устройстве. Такая интеграция снижает надежность систем защиты и управления, так как одним мощным воздействием все устройство выводится из строя или в лучшем случае приводит к «зависанию». Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) устройств управления, автоматики и управления объектов электроэнергетики из второстепенных вопросов, превратилось в задачу первой важности. Этому вопросу и посвящена работа [10]. Достаточно отметить, что уровни логических сигналов в таких широко распространенных микроконтроллерах как PIC, AVR составляют от 0-5В, а в более современных ARM контроллерах уровни логических сигналов и вовсе составляют от 0-3,3В. Очевидно, что

при таких уровнях обработки сигналов, помехоустойчивость будет невысокой и присутствие в схеме действующей помехи с амплитудой единиц вольт вызовет нарушение работы устройства защиты, автоматики или управления [30]. Примерные значения импульсного напряжения (В) и энергии (Дж), при которых происходит необратимое повреждение компонентов в таблице 1 и 2. В таблице 3 приведены ориентировочные значения напряженности магнитного поля, при котором происходит нарушение функционирования для некоторых устройств и компонентов.

Действующая электромагнитная обстановка на трансформаторной подстанции определяется следующим набором факторов [17]:

- потенциалы на системе заземления (ЗУ) при воздействии грозовых перенапряжений и коротких замыканиях;

- импульсные помехи на интерфейсных цепях (далее, как интерфейс RS-485) при воздействии грозовых разрядов;

- импульсные помехи при коммутациях;

- высокочастотные наводки (ВЧ) при коммутациях электрооборудования сравнительно малой мощности;

- провалы, прерывания и выбросы напряжения при нормальных и аварийных режимах работы первичного оборудования;

- ВЧ наводки от работы мощных полупроводниковых преобразователей;

- электростатический разряд;

- работа радиостанций малой, средней и большой мощности.

Таблица 1 – Приближенные сравнительные значения энергии (Дж), при которых необратимо происходят повреждения компонентов

1. Трансформаторы	$10^4 \div 10^6$ Дж
2. Выключатели	$10^{-1} \div 10$ Дж
3. Контактторы	$10^{-4} \div 1$ Дж
4. Тиристоры	$10^{-4} \div 10^2$ Дж
5. Силовые диоды	$10^{-2} \div 1$ Дж
6. Реле	$10^{-6} \div 10^{-4}$ Дж
7. Резисторы	$10^{-2} \div 1$ Дж
8. Мощные транзисторы	$10^{-6} \div 1$ Дж
9. Выпрямительные диоды	$10^{-5} \div 10^{-2}$ Дж
10. Пленочные резисторы	$10^{-3} \div 10^{-1}$ Дж
11. Герконы	$10^{-7} \div 10^{-3}$ Дж
12. Высокочастотные транзисторы	$10^{-6} \div 10^{-3}$ Дж
13. Интегральная электроника	$10^{-10} \div 10^{-3}$ Дж

Таблица 2 – Импульсные напряжения пробоя изоляции

Элемент	$\frac{\partial U}{\partial t}$
1. Дискретная электроника	От 100 В
2. Микросхемы TTL	От 20 В
3. Микросхемы МОП	От 20 В
4. Провода монтажные	От 0.4 кВ
5. Сигнальные и измерительные кабели	От 0.4 кВ
6. Кабели питания аппаратуры	От 2кВ

Таблица 3 –Помехоустойчивость при воздействии магнитного поля частотой 50 Гц

Объект	Граничное значение А/м	Проявление
1. Дисплей с ЭЛТ	2-20	Искажение изображения и цветопередачи
2. ЭВМ	500-600	Нарушение функционирования
3. Цепи коммутации	До 2000	Нарушение функционирования
4.ОЗУ на магнитных носителях	До 2000	Необратимые изменения информации

Цель работы:

Оценка уровня электромагнитных воздействий на вторичные цепи устройства защиты, автоматики и управления со стороны первичных цепей трансформаторной подстанции 110/10 кВ., в условиях эксплуатации.

Задачи, решаемые для достижения цели:

- описать объект исследования;
- получить схемы замещения, выполнить расчет ЭМП по упрощенной модели и оценочный расчет ЗУ ЗРУ-10кВ;
- предложить мероприятия по снижению ЭМП во вторичных цепях трансформаторной подстанции 110/10кВ и произвести оценку ЭМП экспериментальным способом.

1 Основные вопросы обеспечения электромагнитной совместимости

Последние два десятилетия ознаменованы интенсивной реконструкцией электроэнергетических систем. Причиной тому, является действие ряда программ по модернизации основных фондов объектов электроэнергетики, принятых правительством РФ в период высоких цен на нефть. Модернизации подвергается весь комплекс системы транзита электроэнергии: это и электро-сетевое хозяйство, генерирующие мощности, подстанционное и станционное оборудование.

В настоящее время модернизация устройств защиты, автоматики и управления (релейная защита-РЗА) проводится по принципу замены электромеханических устройств защиты и управления на микропроцессорные терминалы защит, автоматики и управления. Модернизируемый парк электромеханических РЗА отработал с 70-80 годов 20 века и изношен «морально» и физически.

В силу специфики, объекты электроэнергетики являются источниками мощных электромагнитных полей, которые пронизывая насквозь все окружающее пространство и наводя токи в проводящих средах сопредельных устройствах, компонентах, объектах. Вместе с тем устройства управления, защиты и автоматики, объектов электроэнергетических систем как наиболее чувствительное, сильнее всего подвержены воздействию электромагнитных полей от работы сопредельного оборудования, а также от работы устройств и компонентов систем, функционально входящих в эти объекты. Во времена безраздельного «царствования» электромеханических реле в устройствах защиты, автоматики и управления в электроэнергетики, проблема электромагнитной совместимости не «стояла» так остро [9].

Компоновка современной трансформаторной подстанции 110/10 кВ и внешний вид ОПУ (оперативный пункт управления) и ЗРУ (закрытое распределительное устройство) приведен на рисунках 1 и 2 соответственно.



Рисунок 1 – ОПУ подстанции 110/10 кВ



Рисунок 2 – ЗРУ -10 кВ подстанции

1.1 Краткие определения и термины

«Электромагнитная совместимость (ЭМС) – «это способность устройства, оборудования или системы функционировать в нормальном режиме, при действующей электромагнитной обстановке, при этом не создавая новых недопустимых электромагнитных помех другому устройству, оборудованию или системе, функционально связанному или не связанному с первым» [11].

«Электромагнитная обстановка (ЭМО) – это некое множество электромагнитных явлений, существующих в данном месте» [11].

«Электромагнитная помеха (ЭМП) – любое электромагнитное воздействие, которое может ухудшить работу устройства, оборудования или системы» [4].

«Уровень ЭМС – это установленное значение ЭМП при котором гарантируется нормальная работа ТС с наибольшей вероятностью (источников и приемников ЭМП)» [4].

Помехоустойчивость – это свойство технического средства (приемника ЭМП) нормально функционировать при воздействии ЭМП [11].

Помеховосприимчивость – это свойство технического средства (приемника ЭМП), связанное с нарушением его функционирования при превышении ЭМП некоего порогового значения [5]. Распределение по уровням помехоустойчивости и помехоэмиссии приведен на рисунке 3.

Различают внутрисистемную ЭМС и внешнюю ЭМС.

Если ЭМС не обеспечено, то возможны функциональные нарушения работы, связанные с отказом оборудования, сокращением сроков службы, выходом оборудования из строя, браком выпускаемой продукции, авариями, вызываемыми ложными срабатываниями аппаратов защит, автоматики и управления [11].

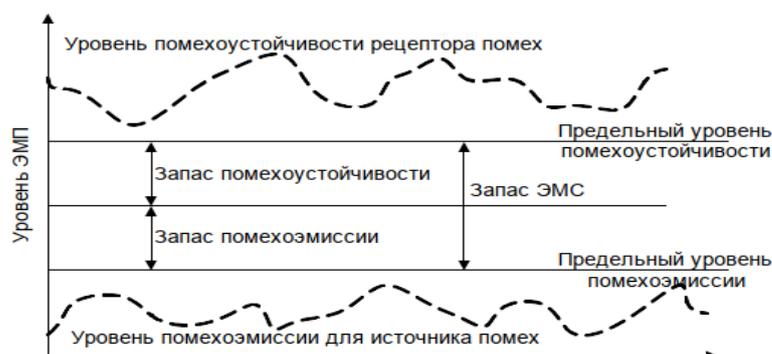


Рисунок 3 –Уровень помехоустойчивости и помехоэмиссии (запас по обеспечению ЭМС технического средства)

1.2 Источники электромагнитных помех

1.2.1 Естественные и искусственные

Естественными источниками ЭМП являются:

1.Электрическое поле земли с напряженностью $E \sim 300 \text{ В/м}$;

2.Магнитное поле земли с напряженностью $H \sim 30 \text{ А/м}$;

Магнитное поле земли, которое увеличивается при возникновении геомагнитных бурь примерно в 10 раз [6].

3.Молния (грозовые разряды). Грозовой разряд молнии сопровождается импульсом тока от 30-35кА до 200-300 кА[3]. Наблюдениями установлено, что одна молния может содержать до 10 разрядов. Время импульсов $t \sim 10 \div 15 -^6 \text{ с}$. Время повторения импульсов $t \sim 10 \div 100 -^6 \text{ с}$ [3]. Статистика повреждений при ЭМП приведена на рисунке 4.

Показано, что чаще всего электромагнитные воздействия обусловлены грозовыми воздействиями и внутренними перенапряжениями от коммутаций.

При грозовом воздействии (ударе молнии) происходит подъем потенциала системы заземления, «определяющей характеристикой является крутизна фронта импульса тока молнии (скорость изменения $\frac{dI}{dt}$), от которой

зависит индуктивное падение напряжения на протяженных проводниках (молниеотводах, токоотводах, заземлителях), а также э.д.с. обусловленные электромагнитным полем» [8].



Рисунок 4 - Статистика повреждений при ЭМП

Примерная схема растекания разряда молнии приведена на рисунке 5.

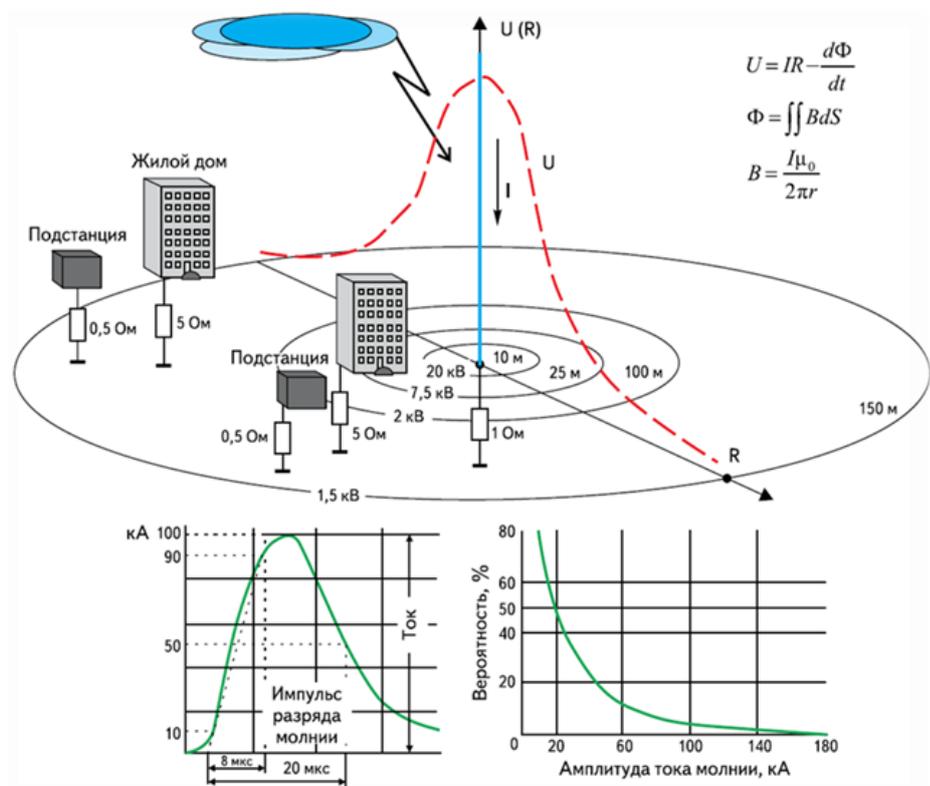


Рисунок 5 –Растекание тока при ударе молнии

1.2.2 К искусственным источникам ЭМП относятся:

-Электроэнергетические,

-электротехнические,

-радиотехнические и иные устройства или системы устройств, использующих электроэнергию для работы.

1.3 Классификация электромагнитных помех

Все многообразие вредных электромагнитных воздействий на приборы и устройства делятся на кондуктивные от слова (conductor –проводник) и полевые, т.е. наведенные электромагнитным полем. Таким образом, ЭМП могут распространяться как по проводам, так и наведением.

Различают низкочастотные (НЧ) до 9кГц и высокочастотные (ВЧ) выше 9 кГц.



Рисунок 6 –Классификация ЭМП по частотному спектру и периоду

Кондуктивные НЧ ЭМП – в этом случае электромагнитную совместимость рассматривают совместно с СЭС (системой электроснабжения по линиям питания) и подразделяются на:

а) Гармоники и интергармоники до $2 \div 3$ кГц, источник возникновения большие нелинейные нагрузки (преобразовательные установки).

б) Колебания, провалы, прерывания напряжения

в) Несимметрия напряжения

Наведенные НЧ ЭМП - источником распространения являются силовые кабели, токи, протекающие по ним, создают электромагнитное поле, которое может наводить ЭМП в интерфейсных и контрольных кабелях.

а) Магнитные поля (ВЛ., трансформаторы, эл. дв-ли), для примера ВЛ $B \sim 40 \times 10^{-6}$ Тл. ЭЛТ восприимчив к значениям $B \sim 0.5 \div 2 \times 10^{-6}$ Тл.

б) Электрические поля (ВЛ., подстанции) [29].

Спектральная плотность мощности ЭМП приведена на рисунке 7.



Рисунок 7 –Спектральная плотность мощности электромагнитной помехи

Вывод по разделу 1

Можно отметить, что условия обеспечения электромагнитной совместимости различных видов электрооборудования и электронной техники на объекте электроэнергетики, и в дальнейшем будут ухудшаться, по объективным и субъективным причинам. Если рассматривать электромагнитную обстановку во взаимодействии с естественными источниками ЭМП, то воздействия со стороны их (естественных источников

ЭМП) на электрооборудование и электронную технику будет постоянными, в силу того что, (частота грозových разрядов $f_{гр}$ и магнитное поле земли $H_{земли}$ – постоянны). С воздействиями от искусственных источников ЭМП (они же и приемники ЭМП, чаще всего) можно ожидать ухудшения ситуации в плане обеспечения ЭМС. В складывающихся условиях, направление работ по обеспечению ЭМС на объектах электроэнергетики представляется несколькими аспектами:

- правовой (изменение НТД ввиду новых исследований в области обеспечения ЭМС и общего технического развития);

- совершенствование расчетных методик и ПО моделирования в области обеспечения ЭМС;

- совершенствование измерительных средств и их интеграцию в устройства защиты, автоматики и управления.

2 Описание и назначение объекта исследования

2.1 Краткая характеристика объекта

Действующий объект – электрическая подстанция 110/10 кВ, находящийся в черте города Тольятти Самарской области.

Реконструкция подстанции произведена в 2014 году: произведена замена масляных выключателей 110кВ на вакуумные, произведена замена электромеханической релейной защиты на микропроцессорные. ОПУ совмещено с ЗРУ-10 кВ. По назначению подстанция относится к - понизительной подстанции районного назначения для трансформации 110 кВ в 10 кВ и дальнейшего распределения.

Основные нагрузки – это промышленный сектор и предприятия малого и среднего бизнеса, преимущественно II и III категории надежности.

Характер нагрузок – активно-индуктивный (значительное число электрических машин различного назначения на производствах малого и среднего бизнеса).

2.1.1 Сведения о применяемом электротехническом оборудовании

Открытое распределительное устройство ОРУ-110 кВ выполнено по схеме блок (линия - трансформатор) с вакуумным выключателем.

Закрытое распределительное устройство 10 кВ (ЗРУ-10 кВ) выполняется односекционным с рабочим и резервным вводами, выполненным по типу комплектного распределительного устройства наружной установки (КРУН).

2.1.2 ОРУ-110 кВ

Оборудование 110 кВ устанавливается на блоках. Высота фундаментов под блоки 0,5м от поверхности земли.

Выбран силовой масляный трехфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой на стороне 10кВ типа ТРДН единичной мощностью 63 МВА исполнения Y1 наружной установки, с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла.

Трансформаторы напряжения на стороне 110 кВ применяются антирезонансные (группа соединения У /У /Д; коэффициент трансформации 110000//3t100/133100/133100), с установкой ящика зажимов. Разъединители 110 кВ применяются с двигательными приводами главного ножа и заземляющего ножа со стороны линии линейного разъединителя на остальных разъединителях устанавливаются ручные привода главных и заземляющих ножей.

2.1.3 ЗРУ-10 кВ

Закрытое распределительное устройство 10 кВ состоит из одной секции, выполненных ячейками 10 кВ в двухрядном исполнении установленных в электротехническом модуле.

Питание РУ-10 кВ осуществляется по гибкой связи ОРУ и шинопроводу ввода. В ячейках КРУ установлены вакуумные выключатели 10 кВ с пружинным приводом, трансформаторы напряжения с литой изоляцией 10 кВ. Закрытое распределительное устройство выполнено в электротехническом модуле, с двумя выходами. Электротехнический модуль имеет II степень огнестойкости.

Трансформатор собственных нужд 10 кВ выполнен в ячейке КРУ СЭЩ-бЗ, установленный в электротехническом модуле. Подключение к шинам РУ 10 кВ выполнено до ввода 10кВ.

2.1.4 Общеподстанционный пункт управления

Общеподстанционный пункт управления (ОПУ) размещается в электротехническом модуле ЗРУ-10 кВ. В ОПУ устанавливаются:

- щит управления выключателями 110 кВ, 10 кВ с измерительными приборами;
- щит собственных нужд;
- панель защиты, автоматики 110 силового трансформатора с автоматическим регулированием напряжения;
- центральной сигнализации;
- шкаф оперативного постоянного тока.

Схема однолинейная трансформаторной подстанции на рисунке 8.

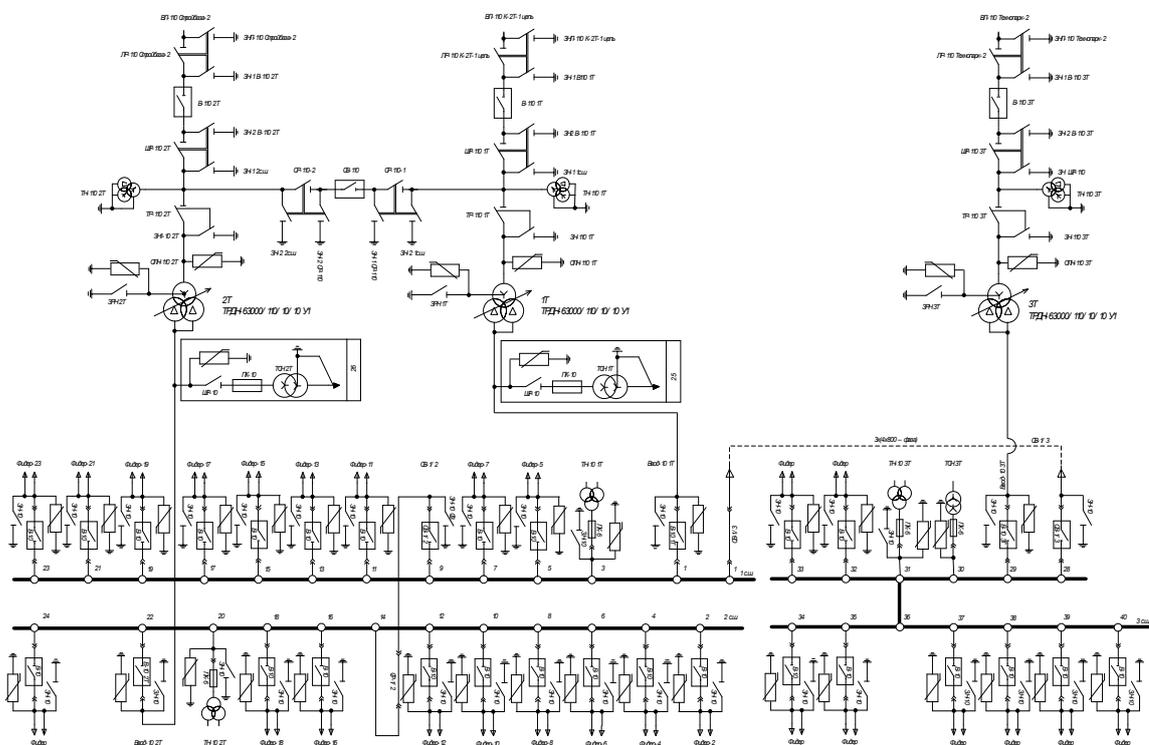


Рисунок 8 – Схема однолинейная трансформаторной подстанции 110/10кВ

2.1.5 Меры защиты от перенапряжений на стороне 110 и 10 кВ

Применение мер защиты от перенапряжений в высоковольтных цепях объектов электроэнергетики, предполагает применение ограничителей перенапряжений (ОПН)[15]. Самыми частыми перенапряжениями в высоковольтных цепях, являются перенапряжения, возникающие на проводах или шинах относительно земли. Перенапряжения существенно

сокращают срок службы изоляции. Различают перенапряжения – внешние, которые вызываются в основном грозовыми воздействиями и внутренние, которые вызываются режимной коммутацией. Неправильно выбранные ОПН снижают надежность электрооборудования и ухудшают ЭМС технических средств.

В качестве первой ступени защиты от перенапряжений применяются ОПН по сторонам 110 и 10 кВ. На рисунке 8 – (однолинейная схема трансформаторной подстанции 110/10 кВ.) приведены точки подключения ОПН сторон ВН и НН.

Характеристики примененных ОПН сторон ВН и НН трансформаторной подстанции 110/10кВ приведены в таблицах 4 - ОПН - 110/88/10/550 и таблице 5- ОПН -10/88/10/550.

Таблица 4 –Электрические характеристики ОПН -110/88/10/550

Параметр	ОПН-110/88
Удоп. кВ	88
Уном. кВ	110
Укл. кВ,	110
Уост. кВ, при $t = 30/60$ мкс, $I_a - 250A$	213
Уост. кВ, при $t = 8/20$ мкс, $I_a - 20000A$	305
Уост. кВ, при $t = 1/10$ мкс, $I_a - 10000 A$	317
Амплитуда, выдерживаемого не менее 2 раз импульса тока $t = 4/10$ мкс, кА.	100
Выдерживаемый импульс тока не менее 18 раз , А	550
Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ	2.7

Таблица 5 –Характеристики ОПН -10/88/10/550

Параметр	ОПН-10/12
Удоп. кВ	12
Уном. кВ	12
Укл. кВ,	10
Уост. кВ, при $t = 30/60$ мкс, $I_a - 250A$	31,5
Уост. кВ, при $t = 8/20$ мкс, $I_a - 10000A$	39,9
Уост. кВ, при $t = 1/10$ мкс, $I_a - 10000 A$	45
Амплитуда, выдерживаемого не менее 2 раз импульса тока $t = 4/10$ мкс, кА.	100
Выдерживаемый импульс тока не менее 18 раз , А	400
Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ	2.7

2.2 Устройства защиты, автоматики и управления

В качестве аппаратуры защиты, автоматики и управления подстанции применяются микропроцессорные терминалы производства ООО НПП «Экра»[12].

Оперативный ток на подстанции - постоянный 220 В. Источником оперативного тока является ШОТ-М аппарат управления оперативным током, от которого организуется шинки обеспеченного питания для цепей автоматики, защиты, сигнализации и управления. Номинальный выходной ток ШОТ-М не менее 20 А (с аккумуляторной батареей емкостью не менее 91 Ач). Питание ШОТ-М осуществляется от шкафа распределения собственных нужд.

Защита и автоматика трансформатора 110кВ выполняется на базе шкафа защиты трансформатора типа ШЗТ-МТ-051-152 [12]. Внешний вид шкафа защиты приведен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Шкаф защиты 110кВ ШЗТ-МТ-051-152

Шкаф защиты 110кВ ШЗТ-МТ-051-152 комплектуется тремя терминалами, который представлен на рисунке 10. Терминалы именуются комплектами:



Рисунок 10 – Микропроцессорные терминалы в ШЗТ-МТ-051-152

Первый комплект: (в дальнейшем "комплект А1") реализует функции:

-Дифференциальная токовая отсечка (ДТО);

-Дифференциальная токовая защита с торможением (ДЗТ) с учетом работы РПН;

-УРОВ ВН трансформатора (УРОВ);

-УРОВ-приемник (УРОВ);

-Газовая защита трансформатора (ГЗТ);

-Газовая защита РПН (ГЗ РПН).

Второй комплект: (в дальнейшем "комплект А2") реализует функции:

-Максимальная токовая защита стороны ВН с пуском по напряжению (МТЗ ВН);

-Ускоренная МТЗ (УМТЗ);

-Защита от несимметрии и обрыва фазы (ЗОФ);

-Автоматика управления выключателя ВН (АУВ ВН);

- УРОВ-приемник (УРОВ);

-Газовая защита трансформатора (ГЗТ);

-Газовая защита РПН (ГЗ РПН).

Третий комплект: (в дальнейшем "комплект А3") реализует функции управления электроприводами устройства РПН при автоматическом и ручном регулировании.

2.2.1 Релейная защита и автоматика ячеек 10 кВ выполнена на базе терминалов БЭ2502А производства ООО «НПП Экра», который представлен на рисунке 11 [12].

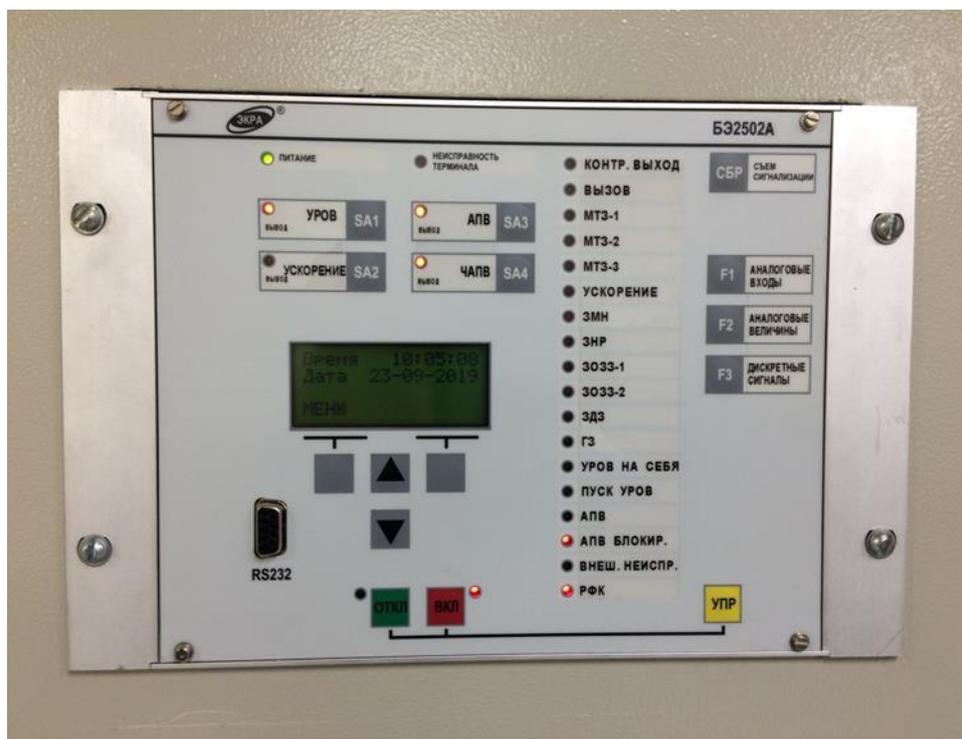


Рисунок 11 –Микропроцессорный терминал БЭ2502А

2.2.2 Технические данные и характеристики МТ БЭ2502А [12]

- номинальный переменный ток входов, А 5 или 1;
- для нулевой последовательности $I_{3\text{НОМ}} (3 * I_{0\text{НОМ}})$; А 5,1 или 0,2
- номинальное междуфазное напряжение переменного тока $U_{\text{НОМ}}$, В 100;
- номинальная частота, Гц 50;
- номинальное напряжение оперативного тока $U_{\text{НОМ.ПИТ}}$, В
постоянного тока 110 или 220;
переменного тока 220.

Терминалы защиты и автоматики БЭ2502А стороны 10кВ размещаются в релейных шкафах ячеек КРУ-10кВ. Внешний вид ячейки КРУ-10кВ приведен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Микропроцессорные терминалы БЭ2502А в ячейках КРУ 10кВ

Реализуемые защиты на базе МТ БЭ2502А:

- максимальная токовая защита (МТЗ),
- защита от однофазных замыканий на землю (ЗОЗЗ),
- логическая защита шин (ЛЗШ),
- защита от минимального напряжения (ЗМН),
- автоматическое повторное включение (АПВ).

2.2.3 RS-485 – промышленный интерфейс для автоматизированных систем управления

Стандарт передачи данных RS-485 (Recommended Standard 485 или EIA/TIA-485-A) –далее просто RS-485, в настоящее время широко используется в электроэнергетике при построении локальных сетей АСУТП в том числе и на подстанциях различного класса напряжениях [14]. В нашем случае (рассматриваемый объект –трансформаторная подстанция 110/10 кВ) посредством интерфейса RS-485 произведено объединение устройств защиты, автоматики и управления (микропроцессорный терминал БЭ2502А для классов напряжений 6 -35кВ). На рисунке 13 приведена схема соединений портов RS-485 МТ БЭ2502А в локальную сеть нижнего уровня [5].

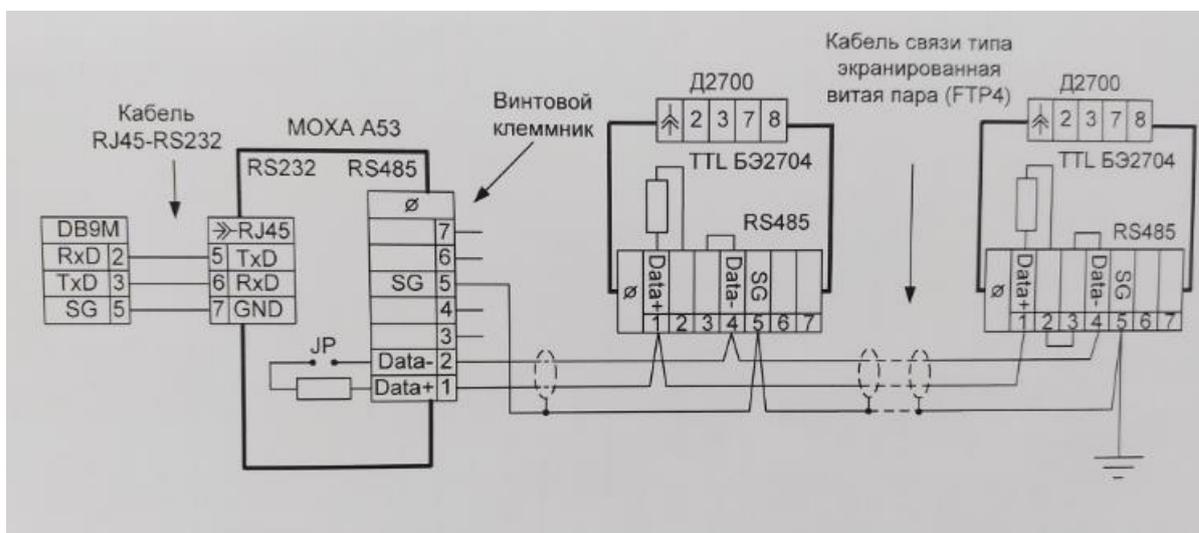


Рисунок 13 –Схема электрическая принципиальная соединений портов RS-485

Для согласования внутренних уровней ТТЛ МТ БЭ2502А, с уровнями интерфейса RS-485 применяются преобразователь уровня Д2700[12]. Основные сведения об изделии Д2700 от производителя приведена в приложении В.

Выполненный монтаж вторичных и интерфейсных цепей в релейном отсеке ячейки 10кВ представлен на рисунке 14.

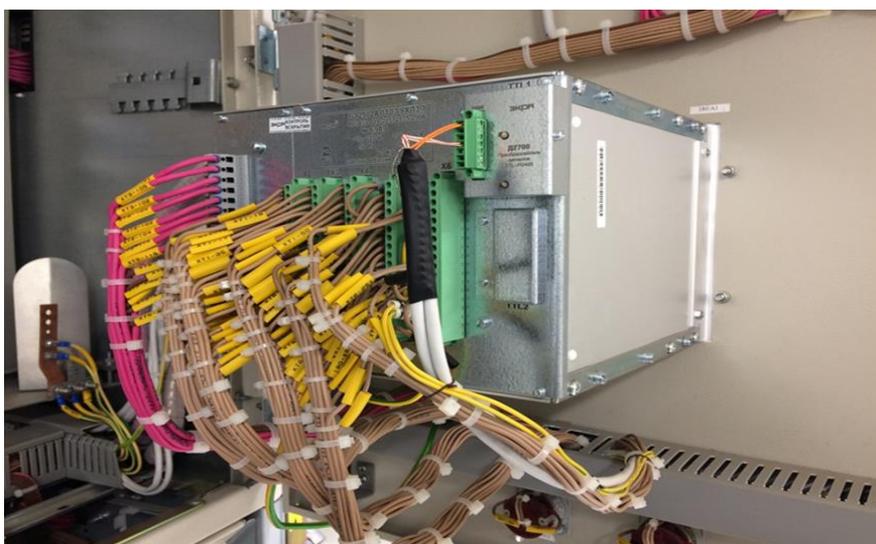


Рисунок 14 – Выполненный монтаж вторичных цепей и интерфейсов RS-485 в релейном отсеке ячейки 10кВ

Основные электрические характеристики RS-485 приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные электрические характеристики RS-485

Число устройств RS-485, шт	32
Линия связи, м	1200
Скорость обмена, Мбит/с	10
U_{min} , В	1,5
U_{max} , В	5
I_{max} , мА	250
$R_{вх}$, кОм	12
$R_{вых}$, Ом	54
Уровень логической единицы меньше или равно, мВ	200
Уровень логической нуля больше или равно, мВ	200

Принцип формирования сигнала в информационной шине схематично представлен на рисунке 15 и 16.

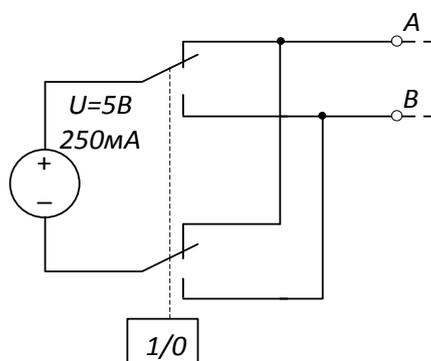


Рисунок 15 – Упрощенная схема формирования уровня сигнала в интерфейсе RS-485

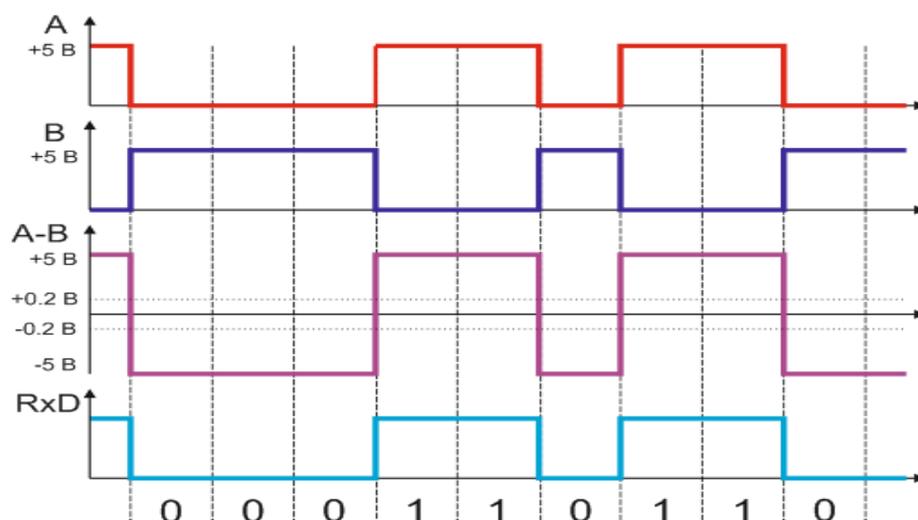


Рисунок 16 – Диаграмма сигналов в информационной шине RS-485

2.3 Грозозащита и заземление

Самым важным и трудоемким аспектом электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики является защита от грозовой деятельности. Следует разделять воздействие грозы на: прямые удары молнии, вторичные проявления ударов молнии и электростатическую

индукцию. Для расчета грозозащитных мероприятий необходимо иметь данные, количественно характеризующие грозовую деятельность. В таблице 7 приведены статистические данные по некоторым странам в отношении количества грозовых дней в году [3].

Таблица 7 – Число грозовых дней в году по странам

Страна	Число грозовых дней
Россия	5-60
Австрия	20-30
США	5-90
Бразилия	106
Великобритания	20-30
Индонезия	100-140
Индия	20-60
Венгрия	25
ЮАР	150

Образование грозовой облачности и грозовая активность зависят от района климатических условий. Еще в СССР было принято условное районирование по интенсивности грозовой деятельности см. таблицу 8 [3].

Таблица 8 – Интенсивность грозовой деятельности по районам

Район по интенсивности гроз	Количество грозовых часов в году
Слабогрозовой	До 10
Среднегрозовой	10-40
Сильногрозовой	40-80
Особо сильногрозовой	Свыше 80

2.3.1 Грозозащита

Грозозащита оборудования подстанции от прямых ударов молнии осуществляется при помощи отдельно стоящего молниеотвода высотой 27,1м (рисунок 17). Все оборудование ПС входит в зону защиты молниеотвода. Расчёт зон защиты молниеотводов выполнен на основании «Инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО153-34.21.122-03 и «Инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений» РД 34.21.122-87 [18].

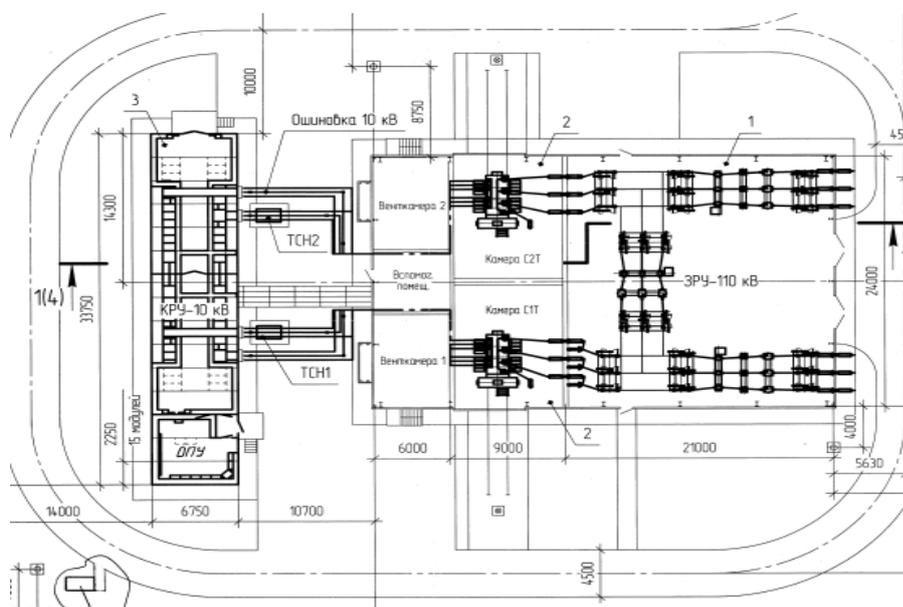


Рисунок 17 –План трансформаторной подстанции 110/10кВ

План организации молниезащиты трансформаторной подстанции 110/10кВ приведен на рисунке 18.

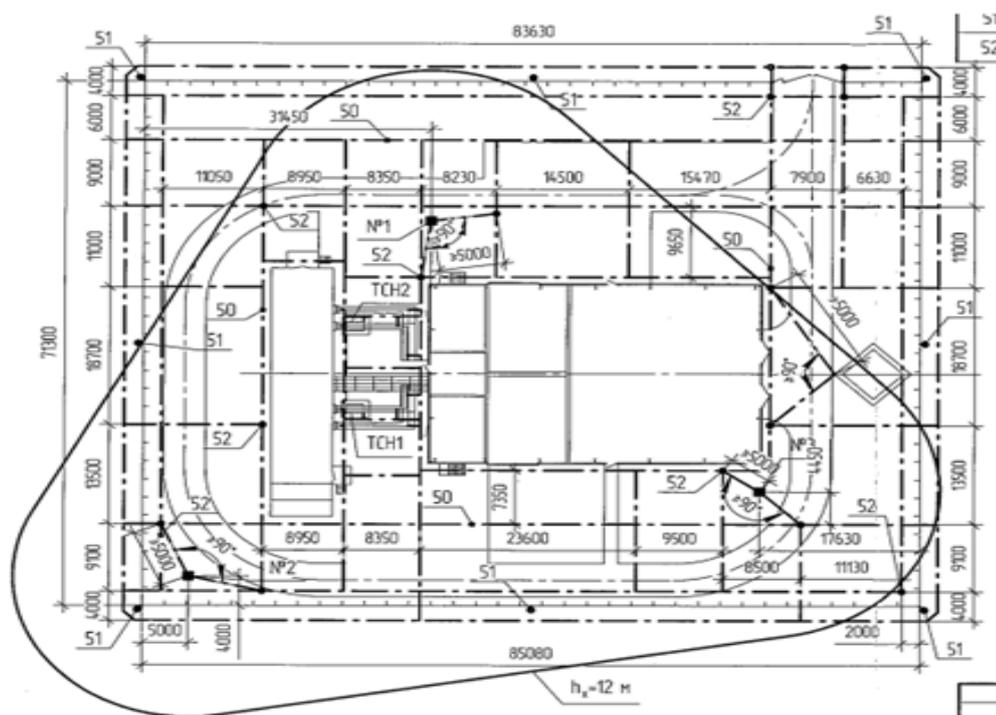


Рисунок 18 – План организации молниезащиты трансформаторной подстанции 110/10кВ

2.3.2 Заземление ЗРУ-10кВ

Система заземления закрытого распределительного устройства (ЗРУ), представляет собой систему из вертикальных заземлителей, в количестве 87 шт., длиной по 3 метра, забитых по площади модульного здания ЗРУ-10кВ и соединены с горизонтальными заземлителями с общей длиной 133 метра [7].

На рисунке 19 представлен план разбивки системы заземления ЗРУ-10кВ трансформаторной подстанции 110/10 кВ.

Согласно проекту реконструкции исследуемой трансформаторной подстанции 110/10кВ система заземления должна быть выполнена согласно рисунку:

- утолщенной линией показаны горизонтальные заземлители;
- поз. №1 показаны вертикальные заземлители ($d=12,5$ мм., $l=3$ метра);
- горизонтальные заземлители заложены на глубине 0,7 метра;

- периметр ЗУ выполнен стальной полосой согласно требованиям главы 1.7 ПУЭ и глав СНиП 3.05.06-85 [15].

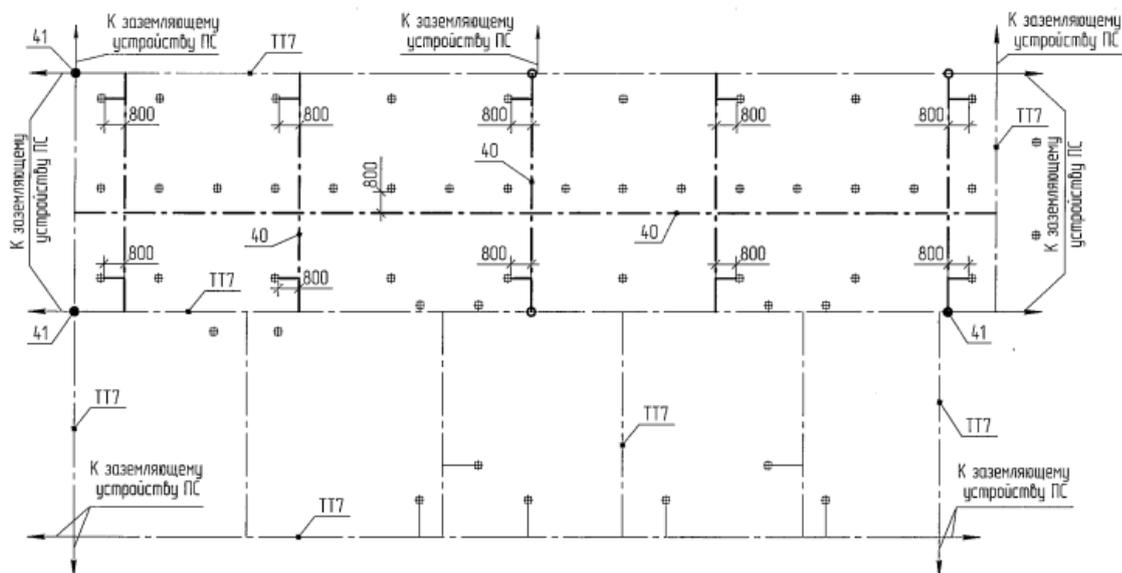


Рисунок 19 –План выполнения ЗУ ЗРУ-10кВ трансформаторной подстанции 110/10 кВ

2.4 НТД в области обеспечения ЭМС на объектах электроэнергетики

Согласно документу СО 34.35.311-2004 «Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях»:

«Порядок работ по определению электромагнитной обстановки на подстанциях и электростанциях состоит из следующих основных этапов:

- получение исходных данных об объекте для проведения работ;
- экспериментально-расчетное определение ЭМО на объекте;
- определение соответствия между уровнями помехоустойчивости ТС, установленных на объекте, и ЭМО в местах размещения этих ТС или степени жесткости испытаний на помехоустойчивость ТС, которые будут установлены на объекте» [18].

«При КЗ на землю на шинах РУ в сетях с эффективно заземленной нейтралью наибольший ток промышленной частоты протекает по заземляющему устройству (ЗУ) при однофазном, (двухфазном) КЗ на землю. Потенциал на ЗУ при этом распределяется неравномерно. Если значение разности потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к оборудованию или устройствам АСТУ, возможно обратное перекрытие изоляции кабелей или устройств. Кроме того, ток КЗ, распределяясь по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей, вызовет повреждение кабелей, если будут превышены допустимые по термической стойкости нагрузки» [5].

«Характерными источниками электромагнитных воздействий в нормальных и аварийных режимах, РУ напряжением выше 1 кВ являются; импульсные помехи при коммутациях и КЗ в распределительных устройствах; импульсные помехи при ударах молнии; электромагнитные поля радиочастотного диапазона; разряды статического электричества; магнитные поля промышленной частоты; импульсные магнитные поля; помехи, связанные с возмущениями в цепях питания. Дополнительными источниками электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе технических средств, являются такие виды вспомогательного электрооборудования как мощные преобразователи, сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструмент и др.» [6].

2.4.1 Испытания на ЭМС

В настоящее время испытания микропроцессорных терминалов защиты на электромагнитную совместимость (ЭМС) проводится по ГОСТ Р 51317.4.5-99 [6], с использованием испытательного генератора микросекундных импульсных помех (ИГ МИП).

Методические указания определяют порядок проведения измерений и расчетов, необходимых для получения количественных данных о наибольших значениях электромагнитных воздействий»[18].

Испытание проводится с приложением однократного импульса с амплитудой $U_m=0,5-4$ кВ и длительностью $t_{и}=1/50 -6,4/16$ мкс. Типовой испытательный импульс приведен на рисунке 20.

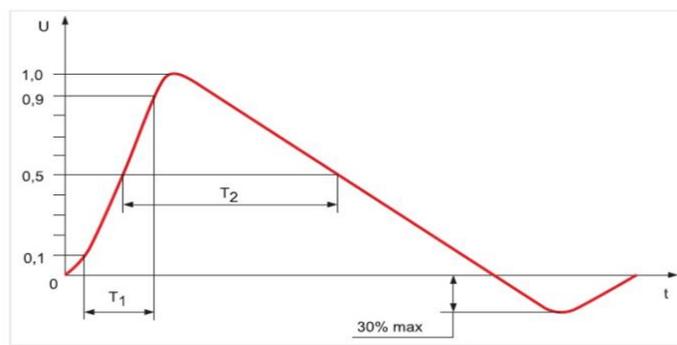


Рисунок 20 – Форма испытательного импульса микросекундной помехи

Виды испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию вторичного оборудования и рекомендуемые степени жесткости, согласно СТО 56947007-29.240.044-2010 [17], приведены на рисунке 21.

2.4.2 Нормы по заземляющим устройствам

«ГОСТР 58882— 2020 Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники» [7]. Данный ГОСТ начал действовать с 2020 года. Выбор параметров заземляющих устройств рекомендуется выполнять, учитывая требования данного ГОСТа. Основные параметры ЗУ, заземлителей, в зависимости от удельного сопротивления грунта и класса электроустановки приведены в выдержке на рисунке 22.

№ п/п	Электромагнитное воздействие	Вид испытаний на помехоустойчивость	Расчетное значение и (рекомендуемая степень жесткости испытаний)
1.	Напряжения промышленной частоты при КЗ на землю.	Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме). ГОСТ 30328 (МЭК 255-5).	600В/2000В
2.	Импульсные помехи, возникающие при коммутациях силового оборудования и КЗ на первичной стороне.	На устойчивость к колебательным затухающим помехам: - одиночных, - повторяющихся. ГОСТ Р 51317.4.12 (МЭК 61000-4-12).	1,5 кВ (3 ст. жест.)
3.	Импульсные помехи от токов молнии.	На устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. ГОСТ Р 51317.4.5 (МЭК 61000-4-5).	4кВ (4 ст. жест.)
4.	Магнитные поля промышленной частоты.	На устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. ГОСТ Р 50648 (МЭК 61000-4-8).	70А/м (5 ст. жест.)
5.	Электромагнитные поля радиочастотного диапазона.	На устойчивость к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям. ГОСТ Р 51317.4.3 ((МЭК 61000-4-3).	0,1В/м (3 ст. жест.)
6.	Импульсные магнитные поля.	На устойчивость к импульсному магнитному полю. ГОСТ Р 50649 (МЭК 61000-4-10).	300А/м (4ст. жест.)
7.	Разряды статического электричества.	На устойчивость к разрядам статического электричества.	1кВ (2 ст. жест.)

Рисунок 21 –Виды испытаний на помехоустойчивость

Объект	Величина ρ_3 (Ом·м)				
	До 100	100-500	500-1000	1000-5000	Более 5000
Подстанции 110кВ	0,5	1,5-0,75	0,75-1,1	1,1-3,7	0,5 ($0,87+\rho_3/770$)
Подстанции 3-35 кВ	$250/I_3$, но не более 10 Ом	$250/I_3-375/I_3$	$250/I_3 -550/I_3$	$250/I_3 - 1850/I_3$	$250/ I_3$ ($0,87+\rho_3/770$)
Опоры линии	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 30	$\leq 6 \cdot 10^{-3} \rho_3$
Отдельно стоящие молниеотводы	10-15				
Стержневые молниеотводы, установленные на порталах	4-5				

Примечания: 1. I_3 - наибольший ток, протекающий через заземляющее устройство; 2. Если имеется связь с ЗУ установки напряжением до 1000 В, то R_3 уменьшается в 2 раза.

Рисунок 22 – Сопротивление ЗУ и заземлителей по классам электроустановок и удельного сопротивления грунта

В реальной электроустановке при отключении тока короткого замыкания возникают многочисленные колебания высокой амплитуды

сложной формы как в момент расхождения контактов в коммутационном аппарате, так и после погасания электрической дуги [16].

Следовательно, однократный импульс напряжения, создаваемый испытательным генератором, поданный на испытуемое устройство защиты, автоматики и управления по выше упомянутому ГОСТу не совсем достоверно воспроизводит то электромагнитное воздействие, которое отражает реальное воздействие на вторичные цепи устройства защиты, автоматики и управления как от режимных и аварийных коммутаций.

2.5 Нарушение работы БЭ2505А при отключении аварийного режима ячейки 10 кВ

В процессе эксплуатации были зафиксированы выходы из строя микропроцессорного терминала защиты автоматики и управления отходящих ячеек 10 кВ в работе, выразившееся в том, что при срабатывании токовой защиты МТЗ 1-3 ступеней, терминал переставал реагировать на кнопки управления и не работал дисплей. Работоспособность основных защит МТ БЭ2502А также не гарантировалась.

Неисправность в работе терминала повторялась с каждым разом срабатывания МТЗ. Было выявлено, что нарушения в работе МТ БЭ2502А ячейки отходящей линии 10 кВ связаны с аварийным режимом и отключением ВЛ-10 кВ данной ячейки от тока К.З. Располагаемый программный осциллограф-регистратор в МТ БЭ2502А не позволяет фиксировать переходные процессы в первичной цепи, записывает только установившиеся и обработанные цифровой фильтрацией значения токов и напряжений.

В ходе поиска всех возможных причин ненормальной работы МТ БЭ2502А, была произведена замена терминала. Был проверен монтаж терминала, его вторичные цепи, цепи напряжения, оперативного тока и интерфейсные цепи (RS-485). Тщательная проверка монтажа показала, что

монтаж токовых цепей, цепей напряжения и интерфейсов по RS-485, выполнен в полном соответствии с рекомендациями производителя микропроцессорного терминала ООО НПП «Экра» и требованиями нормативно-технической документации по монтажу вторичных цепей и цепей телемеханики на объектах электроэнергетики. Нарушения в работе МТ БЭ2502А остались и проявлялись повторно.

Если рассмотреть вторичные цепи микропроцессорного терминала БЭ2502А, то можно их разделить на:

- токовые цепи (от трансформаторов тока);
- цепи напряжения (от трансформаторов напряжения);
- оперативный ток (питание терминала от шкафа ОТ);
- цепи управления выключателем;
- интерфейсные цепи (RS-485).

Вывод по разделу 2

Согласно, предварительно проведенного анализа (чтение аварийных осциллограмм), был сделан вывод о том, что нарушение работы связано с возникновением ЭМП на вторичных цепях микропроцессорного терминала при отключении аварийного режима (двухфазного короткого замыкания). В качестве исходных данных будут использоваться данные токов короткого замыкания, зафиксированные в аварийных осциллограммах. Также необходимо определить гармонический состав тока КЗ для определения повреждения с наибольшим потенциалом возникновения ЭМП во вторичных цепях от тока, протекающего в первичной цепи.

3 Расчетно-аналитическая часть

3.1 Замыкания в сетях с изолированной нейтралью, как источники ЭМП

Традиционно, сети 6,10, 35 кВ в Российской Федерации работают с изолированной нейтралью.

3.1.1 Замыкание на землю одной фазы в сетях с изолированной нейтралью, не вызывает протекание значительных по величине токов, т.к. нет образованного, коротким замыканием, контура тока с активной проводимостью [2]. Рассматриваемый вид замыкания представлен на рисунке 23.

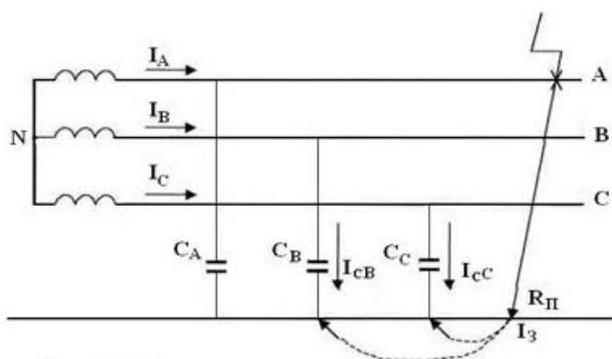


Рисунок 23– Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью

$$I_{л} = I_{с.пг} * l,$$

где $I_{л}$ – ток замыкания линии, обусловленный емкостью линии к земле, А;

$I_{с.пг}$ –погонный емкостной ток при ОЗЗ, А;

l –длина линии, км.

Режим однофазного КЗ возникает в сетях с глухо или эффективно заземленной нейтралью [2].

Осциллограмма однофазного замыкания на землю приведена на рисунке 24.

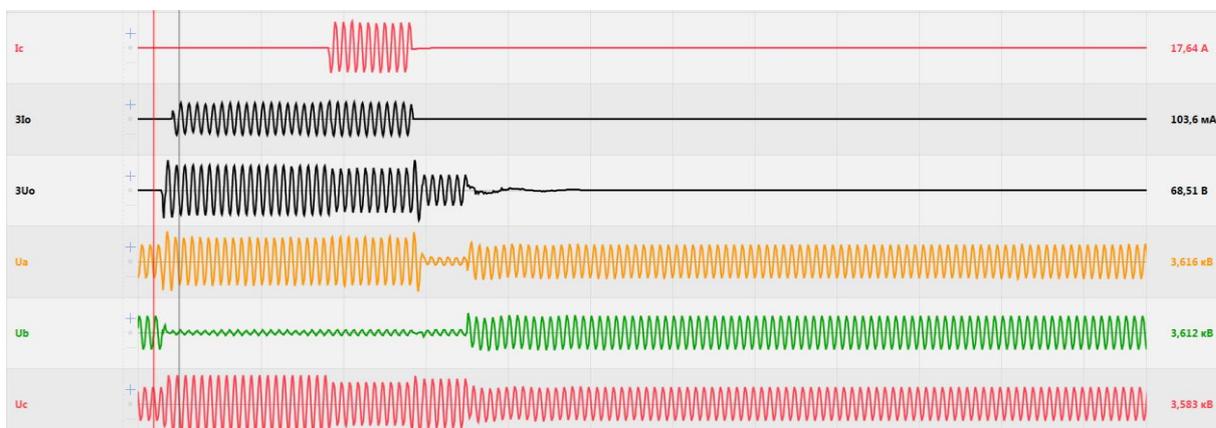


Рисунок 24 – Однофазное замыкание на землю (ОЗЗ)

Векторная диаграмма токов и напряжений при таком виде замыканий приведена на рисунке 25.

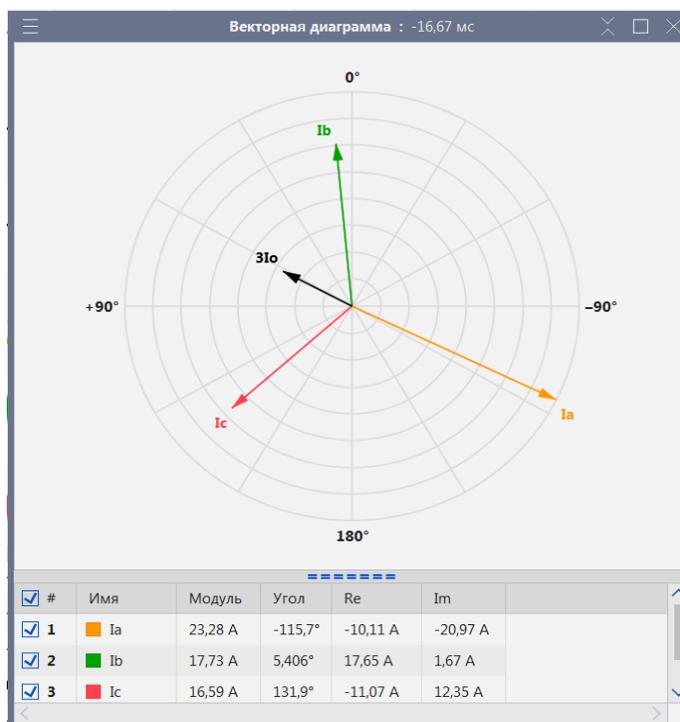


Рисунок 25 – Векторная диаграмма токов и напряжений при однофазном замыкании на землю

МТЗ при этом не срабатывает, так как уставка тока значительна. На однофазные замыкания на землю в этом случае настраивается ЗОЗЗ [2].

3.1.2 Двухфазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью (это сети 6, 10, 35 кВ), характеризуется значительными токами КЗ (рисунок 26) [1].

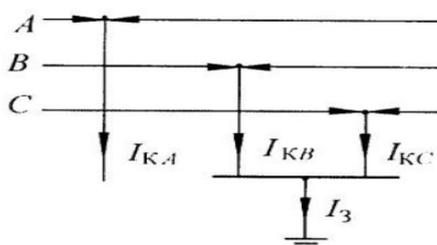


Рисунок 26 – Двухфазное КЗ на землю в сети с изолированной нейтралью

Осциллограмма двухфазного короткого замыкания на приведена на рисунке 27, векторная диаграмма на рисунке 28.

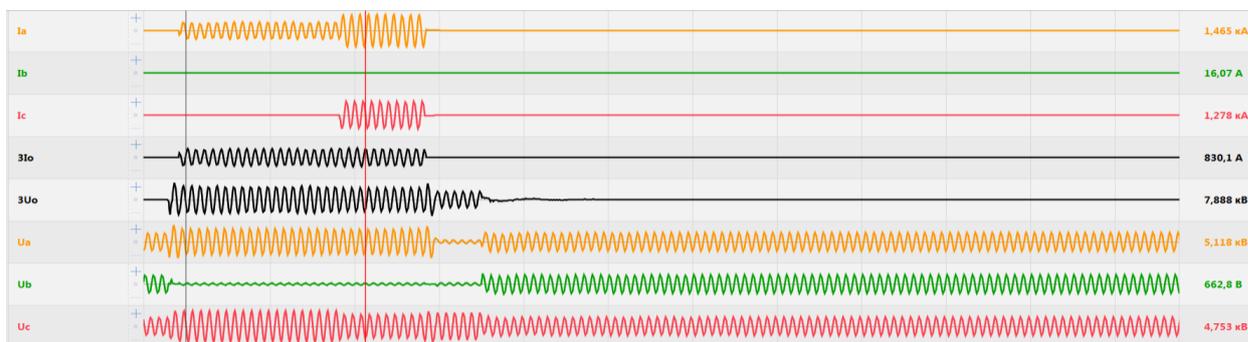


Рисунок 27 – Двухфазное короткое замыкание на землю (OЗЗ)

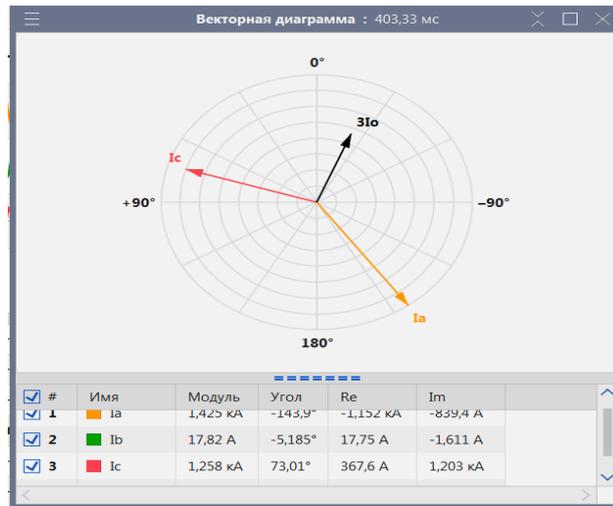


Рисунок 28 – Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю

Гармонический состав токов различных режимов предоставлен на рисунках 29-32.

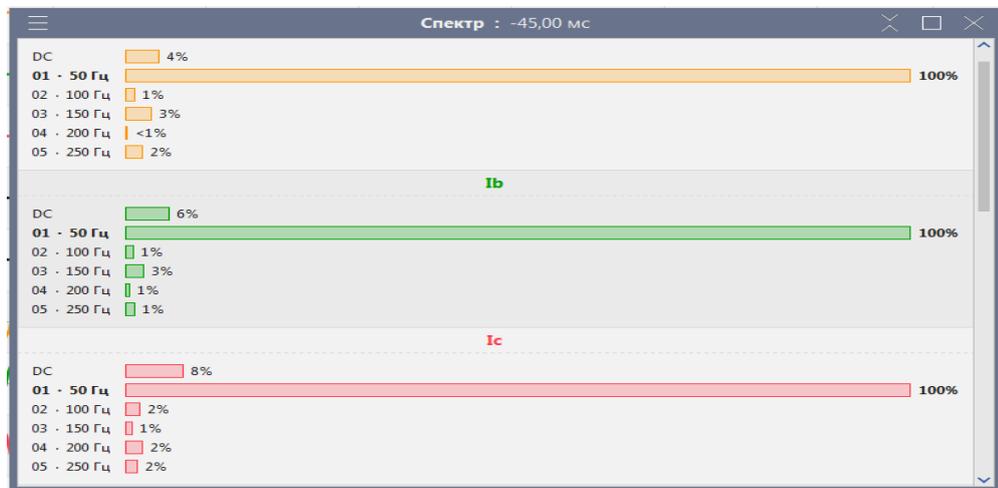


Рисунок 29 – Гармонический состав токов (нормальный режим)



Рисунок 30 – Гармонический состав токов (начало развития ОЗЗ)

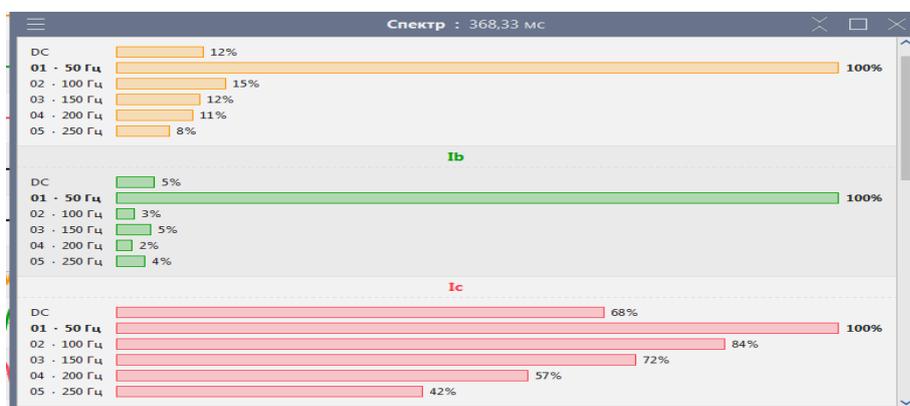


Рисунок 31 – Гармонический состав токов (режим ОЗЗ)

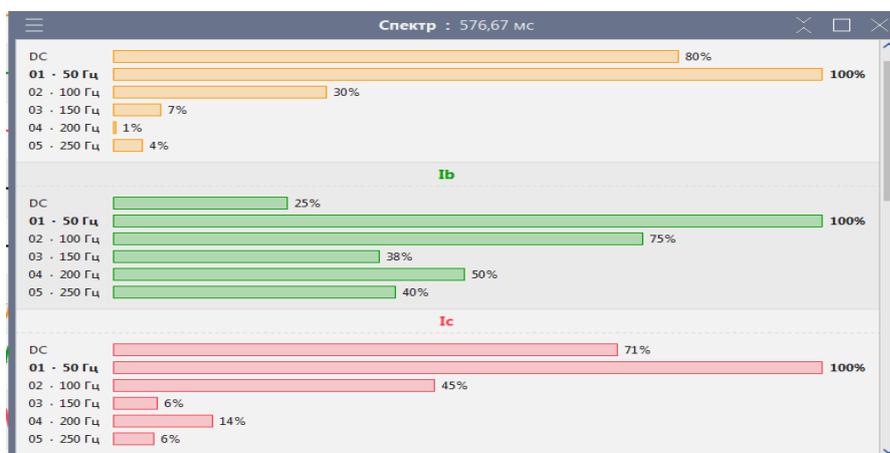


Рисунок 32 – Гармонический состав токов (двухфазное КЗ на землю)

В сети с изолированной нейтралью, возможны три основных вида замыканий:

-однофазное КЗ на землю (ток неповрежденных фаз- незначителен и обусловлен емкостью провода ВЛ по отношению к земле, ток поврежденной фазы зависит от удаленности от источника ЭДС);

-двухфазное КЗ на землю (характеризуется значительными значениями тока поврежденных фаз, значительной термической нагрузкой на провода);

-трехфазное КЗ (значительные токи, срабатывание МТЗ).

Согласно статистическим исследованиям [31], на долю:

-однофазных КЗ на землю приходится примерно 55%

-двухфазных КЗ на землю приходится приблизительно 35% повреждений;

-трехфазных КЗ приходится менее 10%.

Гармонический состав токов короткого замыкания при замыканиях 1-вида (ОЗЗ) и коротких замыканиях 2-вида очень насыщен гармониками вплоть до 5.

3.2 Расчетные схемы замещения

Для оценочного расчета передачи энергии ЭМП во вторичную цепь, необходимо определить геометрические параметры первичного токового контура.

Рассмотрим присоединение отходящей ячейки 10кВ трансформаторной подстанции 110/10 кВ (рисунок 33).

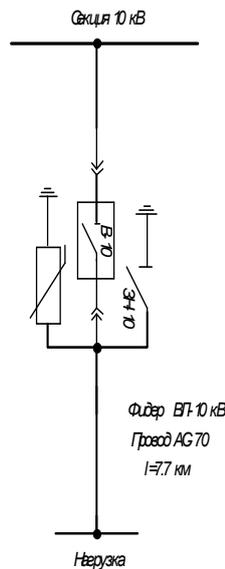


Рисунок 33 – Схема однолинейная отходящей ячейки 10 кВ

Конструктивно ячейка 10кВ представляет собой выкатной элемент вакуумного выключателя В-10 кВ и установленного в ячейке ограничителя перенапряжения ОПН-10 и ЗН-10.

Фидер представляет собой воздушную линию ВЛ-10кВ, выполненную проводом АСБ-70, протяженностью 7.7км. Электрические параметры провода приведены в таблице 9. Рассматриваемое КЗ на фидере происходило на удалении примерно 3 км (по данным оперативно-выездной бригады).

Таблица 9 – Электрические параметры провода АС-70

Погонное активное сопротивление на 1 км	Погонное индуктивное сопротивление на 1 км
0.4218 Ом	0.355 Ом

Схема замещения трехфазной воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением U до 500 кВ и длиной l до 300 км может быть представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами П-образного или Т-

образного типа, которая представлена на рисунках 34 и 35 [1]. Обычно для расчета электрических режимов ВЛ применяют П-образную схему замещения.

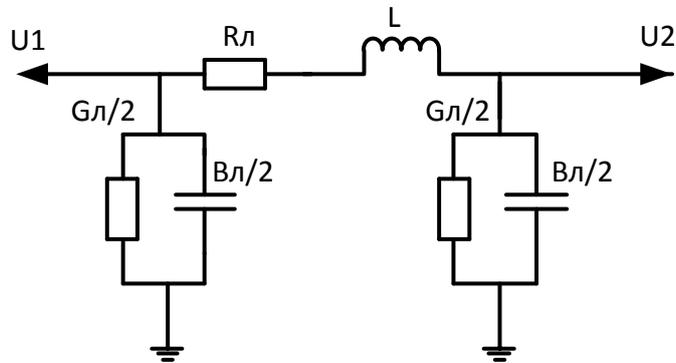


Рисунок 34 – П -образная схема замещения ВЛ

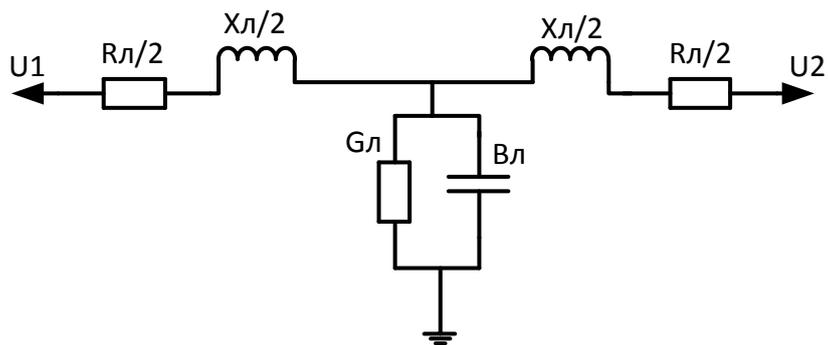


Рисунок 35 – Т -образная схема замещения ВЛ

Обозначим параметры схем замещения обоих типов

Эквивалентная активная проводимость линии ВЛ определим по формуле:

$$G = G_0 * l_n,$$

где G – эквивалентная активная проводимость линии ВЛ, См,

l_n –длина линии, км,

Удельная эквивалентная проводимость линии ВЛ, См/км

$$G_0 = \Delta P_{k.0} / U_{\text{НОМ}}^2$$

где $\Delta P_{k.0}$ – потери активной мощности на корону, Вт

$U_{\text{НОМ}}^2$ – номинальное напряжение линии ВЛ, В.

Для упрощения оценочного расчета, проводимость активных потерь на корону- параметр $G_{л/2}$, учитывать не будем [4], тогда преобразованная схема замещения ВЛ примет вид, который приведен на рисунке 36.

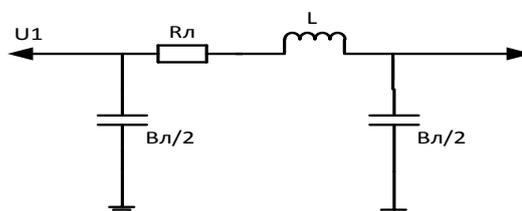


Рисунок 36 – Преобразованная схема замещения ВЛ

Схема замещения двухобмоточного силовой трансформатор представлена на рисунке 37.

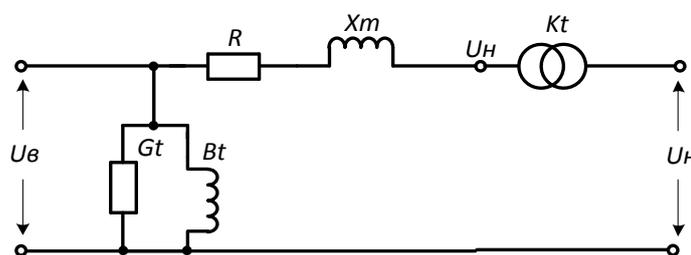


Рисунок 37 – Схема замещения двухобмоточного силового трансформатора

Схема замещения трансформатора при опыте холостого хода (Х.Х.) примет вид, показанный на рисунке 38.

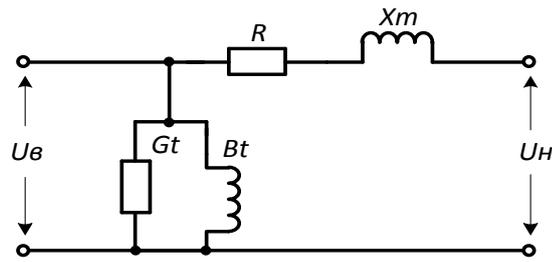


Рисунок 38 –Схема замещения опыта холостого хода (Х.Х.) трансформатора

Схема замещения трансформатора при опыте короткого замыкания (К.З.) примет вид, показанный на рисунке 39.

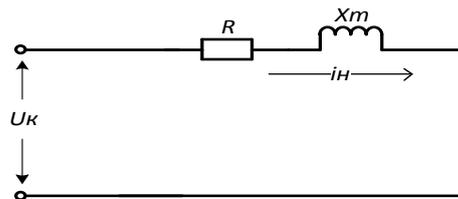


Рисунок 39 –Схема замещения опыта короткого замыкания (К.З.) трансформатора

3.2.1 Расчетная схема замещения при отключении ВЛ от тока К.З

Используя схемы замещения силового трансформатора и линии составим расчетную схему замещения при отключении линии ВЛ от токов короткого замыкания, которая представлена на рисунке 40 [20].

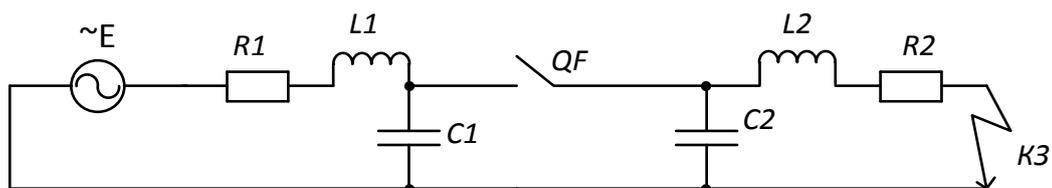


Рисунок 40 –Расчетная схема замещения при отключении ВЛ от тока КЗ

Рассмотрим схему на рисунке 40. Слева от QF часть схемы содержит параметры трансформатора подстанции: L1- индуктивность обмоток трансформатора, R1 –активное сопротивление обмоток трансформатора, C1 – суммарная емкость шинного моста. Справа от QF элементы представляют собой параметры линии ВЛ, это C2 –суммарная емкость проводов ВЛ, L2 – индуктивность линии, R2 –активное сопротивление проводов, сопротивление нагрузки учитывать не будем, т.к. проявляется шунтирующее действие короткого замыкания (К.З.). После отключения QF, цепь делится на две части и, следовательно, можно говорить о двух протекающих процессах. На левой части схемы, параметры переходного процесса будут определяться значениями L1,C1,R1, а справа значениями L2,C2,R2, а также от фазы прохождения тока в момент отключения QF. В начале коммутационного процесса напряжение определяется выражением:

$$U = U_m e^{j\Psi}$$

Ток в индуктивности и напряжение на емкости для левой и правой части схемы при произвольном угле Ψ , определяются выражениями:

$$i_{L0} = |I| \sin(\arg I),$$

$$U_{c0} = |Uc| \sin(\arg Uc),$$

Расчеты для частей схемы на рисунке 40 слева и справа от QF будут проводиться аналогично, поэтому в дальнейшем приводится расчет для левой части, где после коммутации цепи продолжает действовать источник ЭДС E.

Режим, который установился после коммутации цепи обусловлен установившимися значениями токов и напряжений:

$$i_{уст}(t) = |I_{уст}| \sin(\omega t + \arg I_{уст}),$$

$$U_{уст}(t) = |U_{уст}| \sin(\omega t + \arg U_{уст}).$$

Переходной процесс представлен следующими уравнениями:

$$i_L - i_C = 0;$$

$$R_1 i_L + L_1 \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_C dt = U_m(\omega t + \varphi).$$

Исходные параметры схемы замещения на рисунке 40, которые предварительно измерены как: (C1-суммарная емкость шинного моста, C2-суммарная емкость ВЛ) или вычислены как: (L1, L2, R1, R2) представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры расчетной схемы замещения

~E	6.3 кВ	I(к.з.)	1000 А
L1	1.34 Гн	L2	0.0087 Гн
R1	0.065 Ом	R2	3.25 Ом
C1	0.34 мкФ	C2	0.035 мкФ

Расчет в программе MathCad перенапряжений на расходящихся контактах QF схемы рисунке 40.

Форма перенапряжения представляет собой колебательный затухающий характер, который представлен на рисунках 41-44.

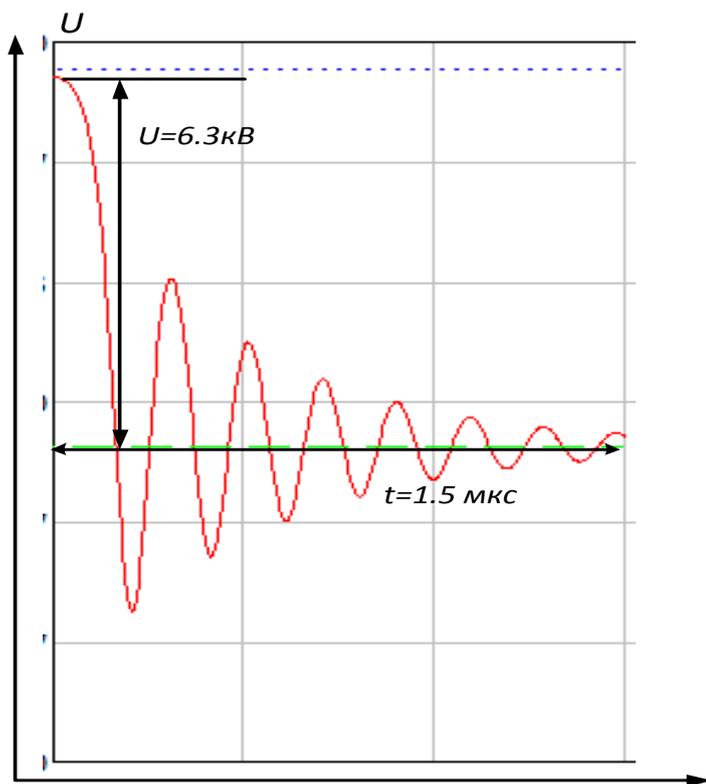


Рисунок 41 – Форма перенапряжения при отключении QF

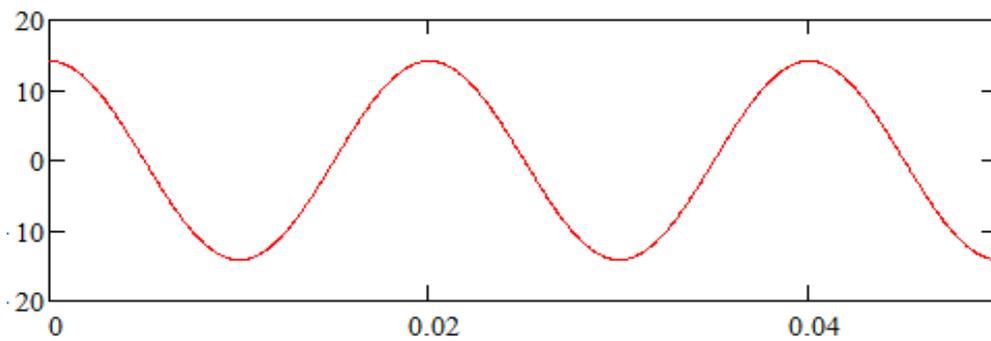


Рисунок 42 – Напряжение напряжения в линии

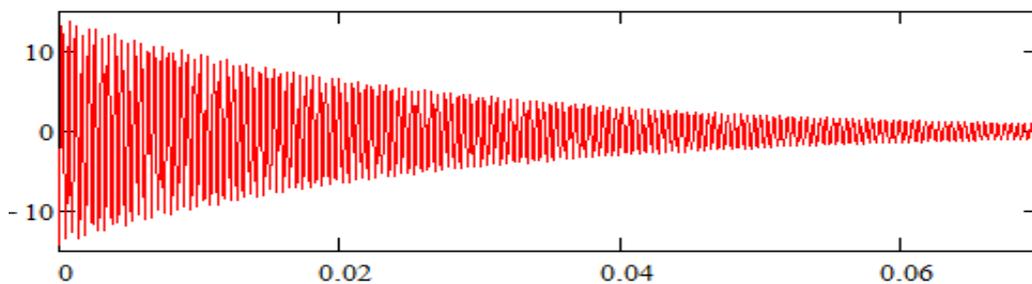


Рисунок 43 – Затухающий колебательный процесс при отключении КЗ

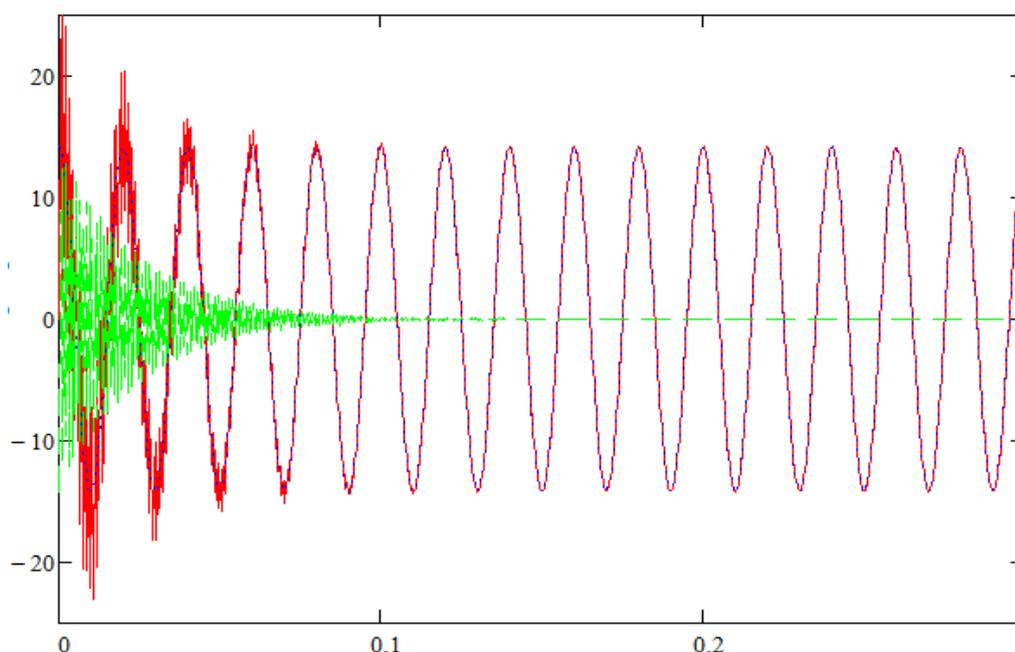


Рисунок 44 – Перенапряжения в линии при отключении КЗ

Вывод: в расчетных методах оценки действующей электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики и оценке обеспечения электромагнитной совместимости технических средств в местах их размещения, важным является выбор адекватной модели для выполнения расчета. Ввиду сложности учета всех факторов расчетная оценка может дать недостоверные результаты, чаще всего в сторону увеличения результата. Потому в практических условиях, при оценке ЭМО следует отдать предпочтение натурным измерениям и сравнениям с результатом расчета.

3.3 Упрощенная модель механизма передачи энергии электромагнитной помехи (ЭМП) на вторичные и цепи устройства защиты, автоматики и управления

Объективно сложилось так, что современную подстанцию, как объект электроэнергетики сложно уже представить с релейной защитой, выполненной целиком и полностью на электромагнитных реле. Повсеместно и широко идет процесс модернизации электромеханических защит на микропроцессорные. При проектировании новых подстанций, и модернизации старых подстанций применяются микропроцессорные терминалы (МТ) защит (Экра, БМРЗ, Сириус и т.д.). Хотя ряд авторов [25], указывает на недальновидность при отказе от электромеханических РЗА и построении релейной защиты на базе микропроцессорных терминалов. Указывается что, вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) в случае применения МТ на объектах электроэнергетики гораздо более серьезные и требуют более глубокой проработки, ввиду более низкой помехозащищенности МТ.

Импульсы перенапряжения, возникающие, в первичных цепях в результате коммутационных или аварийных процессов всегда вызывают ток во вторичных цепях, определяемый как ток помехи [21]. Всегда когда речь заходит о помехах, необходимо пояснить, что считать помехой. Очевидно, что помехой можно считать посторонний электрический сигнал, действующий в цепях ТС амплитудой выше уровня помеховосприимчивости.

Уровень или амплитуда помехи обусловлен механизмом передачи электромагнитной помехи от источника к приемнику рисунок 45.

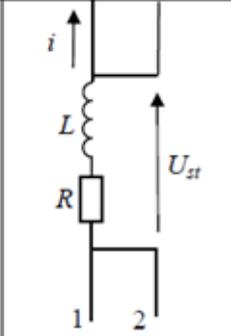
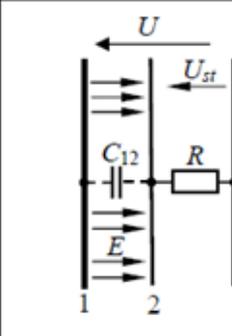
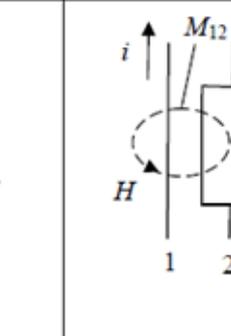
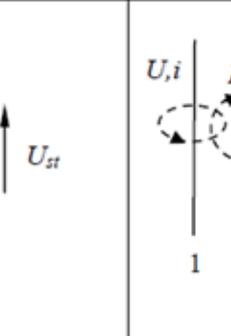
Влияние по проводам	Влияние через поле		
Гальваническая связь (а)	Емкостная связь (E-поле) (б)	Индуктивная связь (H-поле) (в)	Электромагнитная связь (E/H-поле) (г)
			
$U_{st} = iR + L \frac{di}{dt}$	$U_{st} = RC_{12} \frac{dU}{dt}$	$U_{st} = M_{12} \frac{di}{dt}$	$U_{st} \approx E \cdot l$
	ближнее поле, $X < \lambda/2\pi$		дальнее поле, $X > \lambda/2\pi$

Рисунок 45 – Пути передачи электромагнитной помехи от источника к приемнику

Проникновение помехи со стороны источника помехи если рассмотреть ячейку 10 кВ трансформаторной подстанции 110/10 кВ, которая представлена на рисунке 46, как технического средства (ТС), то можно различить 4 условных отсека: отсек сборных шин, отсек высоковольтного оборудования, кабельный отсек и релейный отсек.

Каждый из отсеков условно можно считать генератором электромагнитной помехи (ЭМП). Поля различных «источников - генераторов» ЭМП в реальных условиях будут оказывать влияние на работоспособность ТС. Учитывая, режимы работы объекта электроэнергетики, результирующее поле ЭМП будет иметь сложный характер, и на цепи МТ будут воздействовать помехи как, кондуктивного так и индуктивного характера. В изучении помехозащищенности современной цифровой электронной техники при ее размещении на территории электрической станции и подстанции недостаточно исследованной остается

сама помеха, в частности ее соотношение между продольной электрической и электромагнитной составляющей [21].



Рисунок 46 - Общий вид компоновки ячейки 10 кВ

В общем виде воздействие электромагнитной помехи (ЭМП) на цепи МТ осуществляется через электромагнитные поля. Генерируемая источником энергия ЭМП излучается в пространство в виде излучаемой помехи или распространяться по проводам в виде кондуктивной помехи (определение по ГОСТ Р 50397-2011) [5]. При определении характеристик ЭМО важную роль играют способы ее описания (создание адекватной модели). Существует два метода аналитического описания ЭМО:

- электродинамический метод_наиболее распространенный в практике, заключается в определении значений напряженностей магнитного ($H - A/M$),и электрического полей ($E - B/M$) в интересующей точке от источников ЭМП.

- энергетический метод применяется тогда, когда требуется определить мощность, которая может выделиться в рецепторе (приемнике ЭМП) в виде помехи. Оценку воздействия энергии ЭМП можно произвести с помощью

простейшей модели из двух контуров, расположенных в одной плоскости: 1- является активным (генератор ЭМП); 2-пассивным (приемник ЭМП). Такая модель наиболее адекватно характеризует взаимодействие генератора и приемника ЭМП в реальных условиях [19]. В МТ БЭ2502А как ранее отмечалось, наименее помехозащищенными, являются интерфейсные цепи,

В общем случае требуется решить прикладную задачу по определению уровня ЭМП на цепях промышленного интерфейса RS-485, определяемую как электромагнитное воздействие с контура генератора ЭМП на контур приемника ЭМП. Характеристиками поля ЭМП будут являться, характеристики источника ЭМП, среды распространения ЭМП и расстояние до точки приемника (рецептора) ЭМП [19]. Расстояние от источника ЭМП до приемника ЭМП определяет характер среды распространения –это будет ближняя зона или дальняя зона. Ближняя зона это $-\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{6}\lambda$, где λ –длина волны ЭМП в метрах, определяемая как, $\lambda = \frac{300 \cdot 10^3 \text{ км/с}}{f \text{ Гц}}$, где $300 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ – скорость света в вакууме.

Согласно монографии [19], отношения напряженностей E – электрической к H –магнитной, представляют собой полное волновое сопротивление поля $E/H = Z_0 = 377 \text{ Ом}$.

Так же по утверждению авторов [19], если источником генерируется большой ток и низкое напряжение ($E/H < Z_0$), то в ближней зоне поле ЭМП будет магнитным, если источник ЭМП генерирует малый ток и высокое напряжение ($E/H > Z_0$), то поле в ближней зоне будет электрическим.

По исследованиям, проведенным в [21], частоты источников ЭМП на объектах энергетики лежат в диапазоне 50-1000 Кгц. Ближняя зона для этих частот будет 0,5-50 м. Источниками электрических и электромагнитных помех на станциях и подстанциях являются участки первичных электрических цепей, наиболее близко расположенных ко вторичным цепям.

Как правило это расположенные параллельно или под прямым углом шины. Кроме этого рассматриваемые участки представляют собой замкнутые электрически контуры или части их. Таким образом, для упрощенного расчета на начальном этапе можно считать характер воздействия ЭМП на цепи МТ в ближней зоне. На начальном этапе, условимся не учитывать эффект экранирования конструктивного выполнения ячейки 10кВ и построим упрощенную модель в виде двух контуров [21].

В рассмотрении помехи, как компоненты воздействия на электрическую цепь, важным является вопрос о соотношении электрической и электромагнитной составляющими помехи. Электрическую составляющую помехи, т.е. ее оценку можно осуществить на основании выражения, полученного из схемы на рисунке 47. Ток I , проходящий в проводе А, наводит в сечении провода В ток.

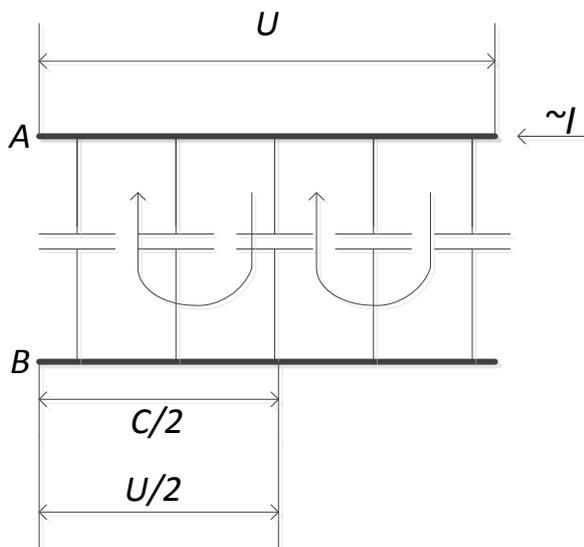


Рисунок 47 – Схема, поясняющая электрическую составляющую помехи

$$I(x) = \int \frac{U(x)}{x_c} dx = \int \frac{U(l - 2x)\omega C}{2l^2} dx = \frac{U\omega C}{2l^2} (lx - x^2);$$

$$U(x) = \frac{U}{2} - \frac{U}{l}x;$$

где x —сопротивление емкостной связи единицы длины провода.

Представим генератор и приемник ЭМП в виде двух контуров, которые представлены на рисунке 48. Учет размеров реальных контуров, приведет к тому, что в одних случаях прямоугольный контур будет трансформироваться в две параллельные линии.

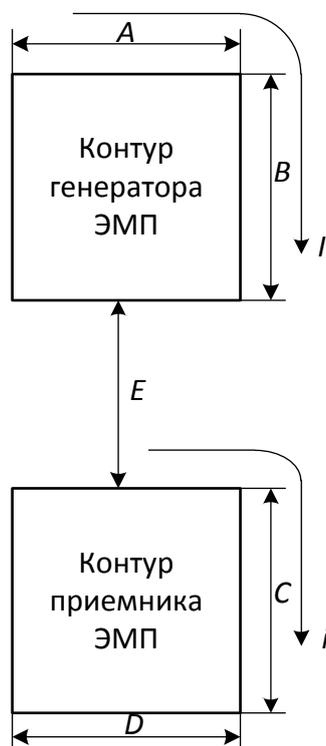


Рисунок 48 –Упрощенная модель механизма передачи ЭМП с контура генератора ЭМП на контур приемника ЭМП

Электрическую мощность ЭМП на элементарном отрезке dx провода контура приемника ЭМП, находящегося в электромагнитном поле контура генератора ЭМП, при токе $i(x)$ определим по выражению:

$$dS_3 = i^2(x) * \frac{Z_k}{4*l} dx = \frac{U^2 * \omega^2 * C^2}{4*l} * (l^2 * x^2 - 2 * l * x^3 + x^4) * \frac{Z_k}{4*l} dx,$$

где Z_k –импеданс (комплексное сопротивление) контура приемника ЭМП, Ом;

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2},$$

где r_k –активное сопротивление Ом,

x_k –индуктивное сопротивление Ом.

Ток помехи в контуре приемника ЭМП определим по формуле:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{Z_k},$$

где \mathcal{E} –ЭДС, наведенная в контуре приемника ЭМП, В

$$\mathcal{E} = 4,44 * f * \Phi_k,$$

где Φ_k –результатирующий магнитный поток, наведенный в контуре приемника ЭМП.

Мощность электромагнитной помехи определим по формуле:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4 * Z_k}.$$

Рассчитаем магнитный поток, охватывающий контур приемника ЭМП, учитывая составляющие:

Φ_k –Результатирующий магнитный поток контура приемника ЭМП,

$$\Phi_k = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4,$$

где Φ_1 – отдельная составляющая магнитного потока по стороне 1,

$$\Phi_1 = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} * (\sqrt{(d+h)^2 + l^2} - \sqrt{d^2 + h^2} + * \ln \frac{(l+\sqrt{d^2+h^2})*(d+h)}{d*(l+\sqrt{(d+h)^2+l^2}} - h);$$

Φ_2 – отдельная составляющая магнитного потока по стороне 2,

$$\Phi_2 = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} * (\sqrt{(D+h)^2 + l^2} - \sqrt{D^2 + h^2} + * \ln \frac{(l+\sqrt{D^2+h^2})*(D+h)}{D*(l+\sqrt{(D+h)^2+l^2}} - h);$$

где $D = d + h$

I_a – Амплитуда синусоидального тока, проходящего по контуру генератора ЭМП.

Φ_3 – отдельная составляющая магнитного потока по стороне 3,

Φ_4 – отдельная составляющая магнитного потока по стороне 4,

$$\begin{aligned} \Phi_3 = \Phi_4 = & -\frac{\mu_0 I_a}{4\pi} * [(d+h) \ln\left(\frac{d}{l} + \sqrt{\left(\frac{d+h}{l}\right)^2 + 1}\right) - d * \ln\left(\frac{d}{l} + \right. \\ & \left. \sqrt{\left(\frac{d}{l}\right)^2 + 1}\right) + l * \sqrt{\left(\frac{d}{l}\right)^2 + 1} - (d+h+h') * \ln\left(\frac{d+h+h'}{l} + \sqrt{\left(\frac{d+h+h'}{l}\right)^2 + 1}\right) + l * \right. \\ & \left. \sqrt{\left(\frac{d+h+h'}{l}\right)^2 + 1} + (d+h) * \ln\left(\frac{d+h+h}{l} + \sqrt{\left(\frac{d+h+h}{l}\right)^2 + 1}\right) - l * \right. \\ & \left. \sqrt{\left(\frac{d+h}{l}\right)^2 + 1} - h * \ln \frac{h}{d+h} + h \left(\frac{d+h}{h} + 1\right) * \ln \left(1 + \frac{h}{d+h}\right) + h * \ln\left(\frac{h}{d} - h * \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{d}{h} + 1\right) * \ln\left(1 + \frac{h}{d}\right)\right], \right. \end{aligned}$$

Используя данные расчетные соотношения произвели расчет уровня ЭМП на проводе А и В порта 1 и 2.

Условно на схеме показаны:

Z1 и Z2 –внутреннее сопротивление ТС,

Сп –емкость преобразователя по отношению к земле,

Q1 –источник синфазной помехи, вызванной разностью потенциалов точками заземления.

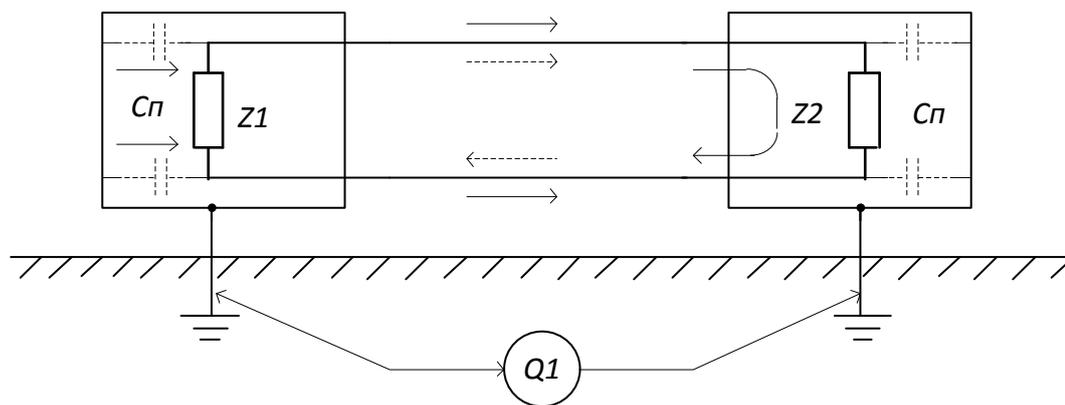


Рисунок 49 –Синфазная помеха, обусловленная разностью потенциалов заземления (вид 1)

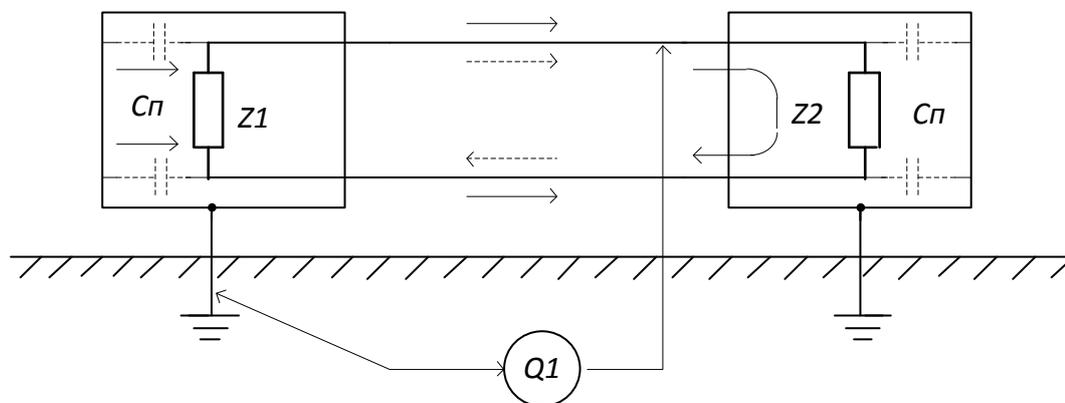


Рисунок 50 –Синфазная помеха (вид 2)

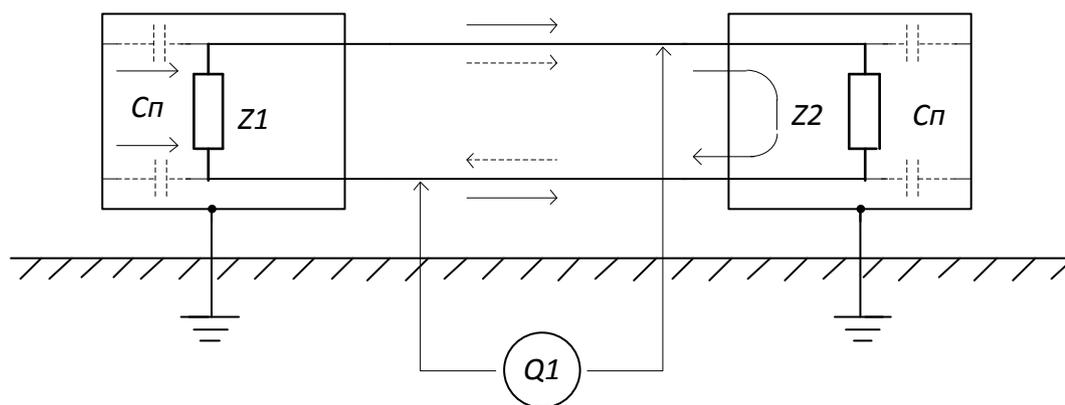


Рисунок 51 –Противофазная помеха

Используя данные подраздела 3.1, данные о геометрических размерах конструктивного выполнения ячейки 10 кВ, определим геометрические параметры контуров А и В как квадрат со стороной 1м (для оценочного расчета) смотреть рисунок 48.

Используем дополнительные параметры для схем на рисунках 49-51:

- $C_{\Pi} = 1 * 10^{-6} \Phi$; (для оценочного расчета)
- $Z_1 = Z_2 = 120 \text{ Ом}$; (входное сопротивление RS-485)
- $f_1 = 50 \text{ Гц}$;
- $f_2 = 1 * 10^5 \text{ Гц}$;
- $f_3 = 1 * 10^6 \text{ Гц}$.

При выполнении расчета по приведенным соотношениям получили данные, которые приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Рассчитанные данные помехи

Вид помехи рисунок 49, 50, 51	f_1	f_2	f_3
Синфазная помеха (вид1)	1.7	16.4	37
Синфазная помеха (вид2)	6.3	14.7	41.2
Противофазная помеха	0	0	0

Вывод –простой оценочной расчет показывает ,что с ростом частоты f , амплитуда помехи, действующей в цепи, увеличивается, это связано с уменьшением емкостного сопротивления таких параметров как C_{Π} . Суммарный магнитный поток проходящий через контур В, зависит от геометрических размеров контуров А и В.

Выражения были получены от формулы магнитной индукции в произвольной точке пространства от синусоидального тока, проходящего по прямолинейному проводнику [1].

Для устранения высокочастотных помех, которые могут сформироваться во вторичных цепях трансформаторной подстанции 110\10

кВ, необходимо широко применять средства подавления –это симметричные дроссели на основе современных кольцевых ферромагнитных материалов с узкой петлей гистерезиса. В ряде случаев может оказаться необходимой применение кабелей «витая-пара» FTP cat.7.

В приложении Г приведен расчет уровня ЭМП в программе «EMI analyzer».

3.4 Оценочный расчет заземляющего устройства трансформаторной подстанции 110/10 кВ

План разбивки заземляющего устройства действующей трансформаторной подстанции 110/10 кВ представлен в приложении Б.

Действующее издание ПУЭ 7 ред. (пункт 1.7.90.) регламентирует, что сопротивление заземляющего устройства электроустановки выше 1000В не более 0,5 Ом с учетом естественных и искусственных заземлителей.

$$r_{расч} = K_c \times K_1 \times r, [22]$$

где $r_{расч}$ –сопротивление грунта,

K_c – сезонный коэффициент, принимаем 1,1

K_1 – коэффициент, учитывающий состояние грунта, 1,15, [22]

r – удельное сопротивление грунта, принимаем 100 Ом,

$$r_{расч} = 1.1 \times 1,15 \times 100 = 126,5$$

Определим сопротивление одиночного вертикального заземлителя:

$$r_{вз} = \frac{r_{расч}}{2\pi l_B} * \left(\ln \frac{2l_B}{d} + 0,5 \ln \frac{4l_B + 7t_1}{l_B + 7t_1} \right),$$

где $r_{вз}$ – сопротивление одиночного заземлителя, Ом

l_B –длина вертикального заземлителя, м

$$r_{\text{вз}} = \frac{126,5}{2\pi \cdot 5} * \left(\ln \frac{2 * 5}{0,0125} + 0,5 \ln \frac{4 * 5 + 7 * 0,7}{5 + 7 * 0,7} \right)$$

$$r_{\text{вз}} = 39,1 \text{ Ом};$$

Рассчитаем достаточное количество вертикальных заземлителей, исходя из требований ПУЭ (пункт 1.7.90.) [19].

$$\text{кол}_{\text{вз}} = \frac{r_{\text{вз}}}{r_{\text{земли}} * k_{\text{исп.в}}}$$

где $r_{\text{земли}}$ – норма сопротивления ЗУ согласно ПУЭ,

$k_{\text{исп.в}}$ – коэффициент использования вертикального заземлителя, 0,8;

$$\text{кол}_{\text{вз}} = \frac{39,1}{0,5 * 0,8} = 97,5$$

Рассчитаем сопротивление горизонтального заземлителя, посредством которого, вертикальные заземлители соединены в контур:

$$r_{\text{гз}} = \frac{r_{\text{гр.расч.}}}{2\pi * l_{\text{г}} * k_{\text{исп.г}}} * \ln \frac{l_{\text{г}}^2}{t_2 * d}$$

где $l_{\text{г}}$ –общая длина горизонтального заземлителя, м 133;

$k_{\text{исп.г}}$ – коэффициент использования горизонт. заземлителя, 0,8 [21]

t_2 –расстояние от поверхности земли до горизонт. заземлителя, 0,7м;

d – диаметр заземлителя, м

$r_{\text{гр.расч.}} = k_{\text{сез}} * k_{\text{сг}} * r_{\text{уд.гр}}$, где

$k_{\text{сез}}$ –коэффициент сезонности, 1,4 [21];

$k_{\text{сг}}$ –коэффициент учитывающий состояние грунта, 1,6 [21];

$r_{\text{уд.гр}}$ –удельное сопротивление грунта, 100 Ом [21];

$r_{\text{гр.расч.}} = 1,4 * 1,6 * 100 = 224 \text{ Ом},$

$$r_{\text{ГЗ}} = \frac{224}{2\pi \cdot 133 \cdot 0.8} * \ln \frac{17689}{0.7 \cdot 0.0125} = 4,7 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление вертикальных заземлителей:

$$r_{\text{ВЗ.СУМ}} = \frac{r_{\text{ВЗ}} * r}{r_{\text{ВЗ}} - r}$$

где $r_{\text{ВЗ.СУМ}}$ – суммарное сопротивление вертикальных заземлителей, Ом

$$r_{\text{ВЗ.СУМ}} = \frac{4,7 * 0,5}{4,7 - 0,5} = 0,56$$

Уточним количество вертикальных заземлителей:

$$n_y = \frac{r_{\text{ВЗ}}}{K_{\text{ИСП.В}} * r_{\text{ВЗ.СУМ}}} = \frac{39,1}{0,8 * 0,56} = 86,6$$

Округлили до 87 шт вертикальных заземлителей.

Рассчитаем результирующее сопротивление заземляющего устройства:

$$r_{\text{ЗУ}} = \frac{\frac{1}{n} * \frac{r_{\text{ВЗ}}}{K_{\text{ИСП.В}}} * r_{\text{ГЗ}}}{\frac{r_{\text{ВЗ}}}{n * K_{\text{ИСП.В}}} + r_{\text{ГЗ}}}$$

где n – уточненное количество вертикальных заземлителей, шт.

$$r_{\text{ЗУ}} = \frac{\frac{1}{87} * \frac{39,1}{0,8} * 4,7}{\frac{39,1}{87 * 0,8} + 4,7} = 0,52$$

Результирующее сопротивление ЗУ получилось 0,52 Ом, это больше чем по ПУЭ, поэтому увеличим количество вертикальных заземлителей до 98 – (первоначальное расчетное значение) и повторим расчет:

$$r_{3y} = \frac{\frac{1}{98} * \frac{39,1}{0,8} * 4,7}{\frac{39,1}{98 * 0,8} + 4,7} = 0,44$$

$$r_{3y} \ll r$$

$$0,44 \ll 0,5.$$

Вывод по разделу 3

При анализе ЭМО трансформаторной подстанции 110/10кВ, наименее помехозащищенными, являются интерфейсные цепи микропроцессорного терминала, посредством которых МТ БЭ2502А интегрирован с силовым оборудованием, являются цепи RS-485, т.е. порты АСУТП.

1) Предложенная расчетная модель передачи ЭМП от контура генератора помехи ЭМП к контуру приемника ЭМП, приведенная в настоящей главе очень приближенная и упрощенная и для первого этапа оценки ЭМО на трансформаторной подстанции вполне адекватная для анализа ЭМП в ближней зоне.

Расчеты, выполненные по предложенной модели, следует рассматривать как первый этап по определению электромагнитной обстановки, поскольку существующие практические приемы не устанавливают соотношений между помехоустойчивостью ТС и помехоэмиссией ТС в месте расположения ТС.

2) Оценочный расчет заземляющего устройства ЗРУ-10кВ показал, что количество вертикальных заземлителей при удельном сопротивлении грунта (100Ом х метр), при длине заземлителя 3метра и расчетной величине сопротивления растекания единичного заземлителя (39,1 Ом) должно составлять не менее 98 шт. По проекту реконструкции трансформаторной подстанции 110/10 кВ количество вертикальных заземлителей составляет 85 шт., что недостаточно по сопротивлению ЗУ (ПУЭ 1.7.90.) для электроустановок выше 1000 В.

4 Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости аппаратов защиты, автоматики и управления трансформаторной подстанции 110/10 кВ

4.1 Мероприятия для снижения уровня ЭМП

Использование УЗИП для защиты от импульсных перенапряжений.

Согласно определению, данному в ГОСТ Р 51992-2011 (МЭК 61643-1-2005): «Устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) – это устройство, которое предназначено для ограничения переходных перенапряжений и для отвода импульсов тока. Это устройство содержит, по крайней мере, один нелинейный элемент» [23]. «Основными элементами, в качестве элементной базы служат такие как – варисторы на основе оксида цинка, различные разрядники, а также полупроводниковые приборы» [7].

«Классификация УЗИП проводится по назначению, конструктивным исполнением и классом испытаний, который регламентируется с ГОСТ Р 51992-2011 (МЭК 61643-1-2005). Классами испытаний УЗИП подразделяются на ступени применения» [23].

«Так УЗИП, испытанные по I классу, устанавливаются в систему молниезащиты для защиты при прямых ударах молнии объекта электроэнергетики или воздушную линию электропередачи (ВЛ). Точки установки УЗИП, испытанных по такому классу –это вводно-распределительное устройство (ВРУ) или главный распределительный щит (ГРЩ). При испытаниях используются следующие испытательные нормы:

- импульсный ток с формой волны тока 10/350 мкс,
- номинальный разрядный ток с формой волны 8/20 мкс,
- импульс напряжения с формой волны 1,2/50 мкс.

Испытания УЗИП, проводимые по II классу по нормам согласно ГОСТ Р 51992-2011:

- номинальный разрядный ток с формой волны 8/20 мкс,

- импульс напряжения с формой волны 1,2/50 мкс. УЗИП этого типа предназначены для защиты распределительной сети объекта электроэнергетики от коммутационных воздействий или как вторая ступень защиты от грозового импульса» [27].

«Испытания УЗИП, проводимые по III классу по нормам согласно ГОСТ Р 51992-2011:

- номинальный разрядный ток с формой волны 8/20 мкс,
- импульс напряжения с формой волны 1,2/50 мкс. УЗИП этого типа используется для защиты внутренней распределительной сети объекта электроэнергетики от остаточных перенапряжений и высокочастотных помех после срабатывания УЗИП I и II ступени» [23].

Для снижения перенапряжений, определяемых как электромагнитные помехи во вторичных цепях микропроцессорных терминалов БЭ2502А, при неблагоприятной электромагнитной обстановке, целесообразно применение УЗИП с соответствующим классом напряжения. Пример применения УЗИП в интерфейсных цепях RS-485 приведен на рисунке 52 [26].

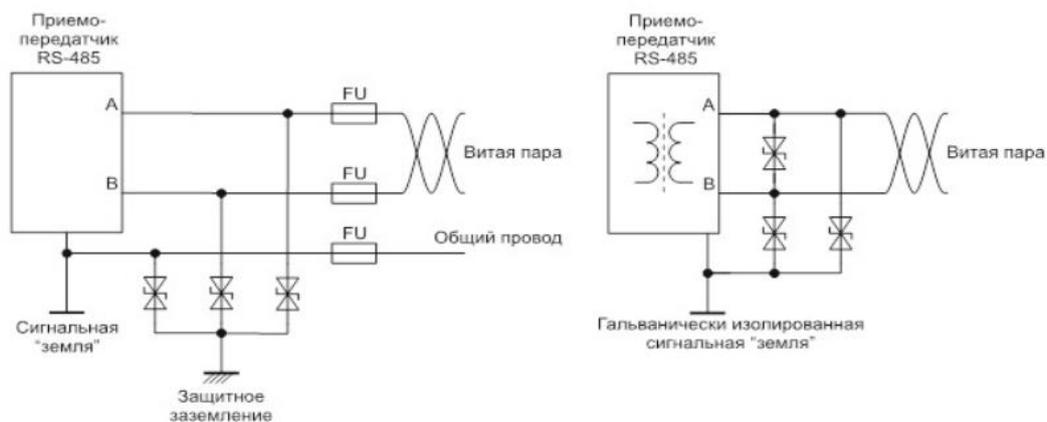


Рисунок 52 – Применение УЗИП в цепях RS-485

Для снижения разности потенциалов «сигнальной земли» в RS-485 существует применение «дренажного провода», который уравнивает

потенциалы между устройствами, связанными витой парой. Пример такого применения приведен на рисунке 53 [28].

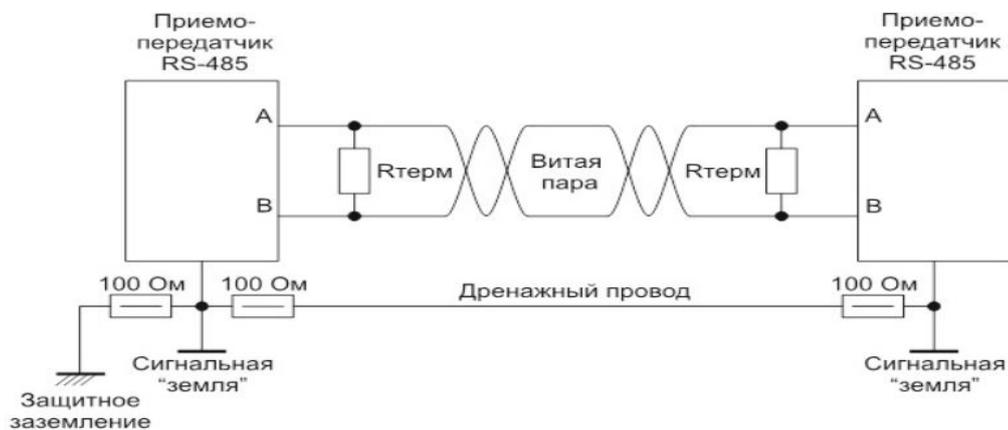


Рисунок 53– Применение дренажного провода RS-485

Пример применения защитного смещения в сетях RS-485 приведен на рисунке 54.



Рисунок 54 –Защитное смещение RS-485

4.2 Мероприятия по снижению перенапряжений при грозовом и коммутационном воздействии

4.2.1 Выбор ОПН ВН и НН с меньшими характеристиками остаточного напряжения.

В определенных режимах работы трансформаторной подстанции 110/10 кВ, возможно появление импульсов перенапряжения по стороне 110 и 10 кВ. Для снижения амплитуды остающегося напряжения при импульсах тока 1/10 мкс и при токах грозových перенапряжений 20000А рекомендуется выбрать ОПН-110/73/10/550/УХЛ1 взамен используемого ОПН-110/88/10/550/УХЛ1 [23]. Электрические характеристики, используемых ОПН ВН и НН приведены в таблице 12 и 13 соответственно.

Таблица 12 – Электрические характеристики ОПН -110/88/10/550 и ОПН-110/73/10/550

Параметр	ОПН-110/88	ОПН-110/73
Удоп. кВ	88	73
Уном. кВ	110	91
Укл. кВ,	110	110
Уост. кВ, при $t = 30/60$ мкс, $I_a - 250A$	213	180
Уост. кВ, при $t = 8/20$ мкс, $I_a - 20000A$	305	257
Уост. кВ, при $t = 1/10$ мкс, $I_a - 10000 A$	317	268
Амплитуда, выдерживаемого не менее 2 раз импульса тока $t = 4/10$ мкс, кА.	100	100
Выдерживаемый импульс тока не менее 18 раз, А	550	550
Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ	2.7	2.7

4.2.2 Уточнение параметров ЗУ ЗРУ-10кВ

Система заземления закрытого распределительного устройства (ЗРУ-10кВ) представляет собой контур, состоящий из 85 шт. вертикальных заземлителей, длиной по 3 метра и диаметром 12,5 мм. Для приведения сопротивления ЗУ к нормативным показателям по ПУЭ, следует довести количество вертикальных заземлителей до 100, добавлением 15 заземлителей длиной по 5 метров.

Таблица 13 –Электрические характеристики ОПН -10/88/10/550

Параметр	ОПН-10/12	ОПН-10/11,5
Удоп. кВ	12	11,5
Уном. кВ	12	11,5
Укл. кВ,	10	10
Uост. кВ, при t =30/60 мкс, Ia-250А	31,5	30,1
Uост. кВ, при t =8/20 мкс, Ia- 10000А	39,9	38,2
Uост. кВ, при t=1/10 мкс, Ia- 10000 А	45	43
Амплитуда, выдерживаемого не менее 2 раз импульса тока t= 4/10 мкс, кА.	100	100
Выдерживаемый импульс тока не менее 18 раз , А	400	400
Удельная энергия одиночного импульса пропускной	2.7	2.7

4.3 Эксперимент по определению уровня ЭМП на вторичных цепях

Для проверки расчетных соотношений по определению уровня ЭМП на вторичных цепях МТ БЭ2502А при режимных коммутациях был предложен эксперимент [13]. Суть эксперимента состоит в осциллографировании момента возникновения ЭМП на исследуемой цепи с помощью отдельного внешнего синхросигнала на цифровом запоминающем осциллографе с полосой пропускания 100МГц. Функциональная схема эксперимента приведены на рисунке 55.

Контролируемые цепи:

– цепь 10кВ за вакуумным выключателем (начало фидера) через ДНВ-80И;

–цепь слаботочная (интерфейс RS-485, информационные шины А и В).

Краткое описание схемы эксперимента:

На МТ БЭ2502А на цепях, которого предстоят измерения уровня ЭМП, необходимо выполнить настройку вывода сигнала пускового токового органа МТЗ для получения сигнала синхронизации.

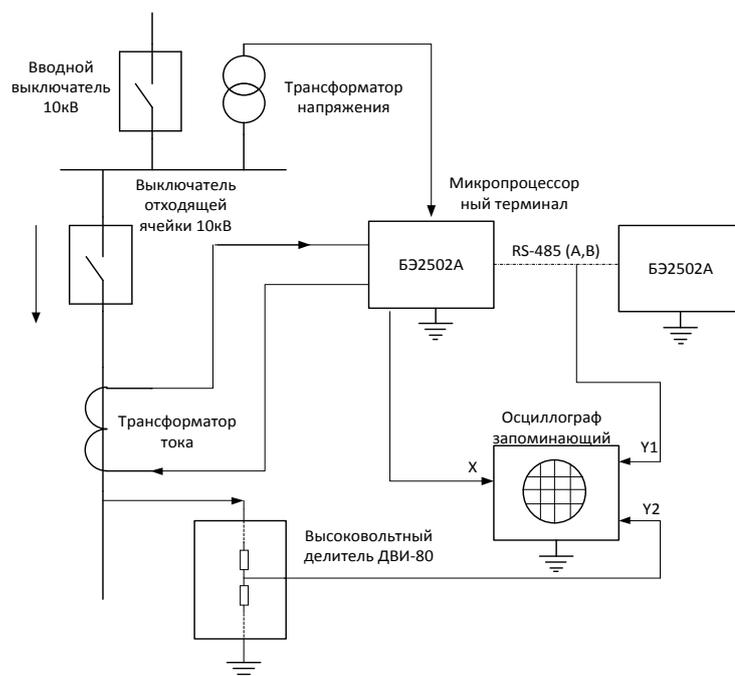


Рисунок 55 – Эксперимент по определению уровня ЭМП на RS-485 при режимных коммутациях

Входы Y1 и Y2 осциллографа, рисунок 55 каналов вертикального отклонения, подключены к цепям: к низковольтному звену делителя ДНВ-80И и к интерфейсным цепям RS-485 (информационная шина А и В) относительно заземляющей шины. Результатом измерения по схеме на рисунке 55 и будет являться синфазная помеха, в системе провод-земля на интерфейсных цепях МТ БЭ2502А. Как рассматривалось ранее в (Расчетная схема замещения при отключении ВЛ от тока КЗ), исследуемая вторичная цепь будет подвержена влиянию ЭМП в моменты:

1 –момент возникновения СЧ и НЧ ЭМП, обусловленный магнитным влиянием тока КЗ первичного контура;

2 –момент изменения характера ЭМП, появления ВЧ ЭМП при расхождении контактов выключателя (отключение тока КЗ).

Дополнительное измерительное оборудование:

Для выполнения эксперимента необходимы цифровой запоминающий осциллограф, например, АКТАКОМ ADS-2332 смотреть рисунок 56.



Рисунок 56 Осциллограф
АКТАКОМ ADS-2332



Рисунок 57 –Делитель напряжения
высоковольтный ДНВ-80И

Для измерений в высоковольтных цепях необходим делитель напряжения, например, такой как ДНВ-80И.

«Назначение высоковольтного делителя напряжения ДНВ-80И:

Делитель напряжений высоковольтный импульсный ДНВ-80И (рисунок 57) предназначен для преобразования уровня амплитуды напряжения постоянного (до 80 кВ) тока и переменного (до 60 кВ) тока до уровня, безопасного для последующей обработки, хранения, передачи или дальнейших преобразований измерительного сигнала» [7].

«ДНВ-80И может использоваться для контроля и регулировки высоковольтных цепей энергоустановок, радиотехнических устройств, электрофизических и рентгеновских установок и т.д.» [7].

Как устройство, ДНВ-80 конструктивно состоит из высоковольтной части и низковольтной части. Высоковольтная часть, представляет собой набор, последовательно соединенных мощных резистивных элементов, которые зашунтированы RC- цепочками для более равномерного распределения напряжения и заполненных кремниевым наполнителем в корпусе из изоляционного материала с низкими диэлектрическими потерями.

Низковольтная часть выполнена делителем напряжения с основанием из проводящего материала. Для подключения измерительных приборов предусмотрены соединительные провода из коаксиального кабеля.

Вывод по разделу 4

Теория передачи ЭМП от источника к рецептору электромагнитного поля, базируется на классической теории электромагнитного поля Максвелла.

Работы по оценке электромагнитной обстановки на трансформаторных подстанциях и электростанциях, целесообразно проводить комплексно. Для выполнения расчетной оценки, необходимо прибегать к упрощению расчетной модели. Если позволяют условия, то следует широко применять современные программы, специально созданные для выполнения расчетов по ЭМС, таких как EMI analyzer, ОПУ-М, ELNAP и др., однако применение их в ряде случаев может оказаться невозможным. Причина тому- высокая цена и низкая доступность.

В ходе исследования ЭМС следует отдавать предпочтение натурным измерениям, как наиболее достоверным в оценке ЭМО.

В процессе работы были предложены мероприятия по улучшению ЭМС аппаратов защиты, управления и автоматики трансформаторной подстанции 110/10 кВ. Были выбраны расчетные соотношения для расчета амплитуды перенапряжений и выполнен расчет на вторичных цепях на всей длине сближения первичных и вторичных цепей.

Были предложены следующие меры: в существующий контур заземления в ОПУ увеличить количество вертикальных заземлителей до 100 шт., добавлением 15 заземлителей по 5 метров, диаметром по 12,5 мм. Таким способом существенно уменьшается сопротивление заземляющего устройства ЗРУ-10кВ и можно ожидать существенного снижения уровня перенапряжений при коммутационном и грозовом воздействии.

Заключение

Решение вопросов электромагнитной совместимости в современных условиях на объектах электроэнергетики давно уже перешло в категорию инженерно-практических задач из научно-теоретических. Актуальность работ по оценке ЭМС и выработке мер по ее улучшению подтверждается статистическими данными по «ложным» срабатываниям релейной защиты очень часто, кажущимися «беспричинными» т.е. вызванными сбоями в работе.

Электромагнитные возмущения во вторичных цепях в системе «провод-земля» и системе «провод-провод» рассматриваются как электромагнитные воздействия, которые представляют опасность повреждения и нарушение функционирования аппаратов защиты, управления и автоматики.

В процессе работы были решены следующие прикладные задачи:

- составление схемы замещения;
- предложена упрощенная модель для оценки ЭМП на вторичных цепях;
- проведен оценочный расчет системы заземления ЗРУ-10кВ;

Также был предложен эксперимент по определению уровня ЭМП в момент возникновения КЗ и отключения КЗ.

Предложенная схема эксперимента, позволяет проводить измерения на электрооборудовании, которое находится в работе, обеспечивая определенную достоверность полученных данных.

Использовались теоретические и прикладные работы отечественных и зарубежных авторов, нормативные документы в области электроэнергетики РФ, материалы научно-технических конференций, периодических печатных изданий.

Список используемых источников

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов. Издательство «Энергия». Москва. 1978.
2. Авербух А.М. Примеры расчетов неполно-фазных режимов и коротких замыканий// Издательство «Энергия». Ленинград.1979.
3. Анастасиев П.И., Зеленецкий М.М., Фролов Ю.А. Молниезащита зданий и сооружений// Издательство «Энергия». Москва. 1975.
4. ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК 61000-4-12-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний.
5. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5:2001) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.
6. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.
7. ГОСТР 58882— 2020 Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники.
8. Глушко В.И., Дерюгина Е.А. Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространения по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения.// Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.2017.
9. Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем// ООО ИПК «Содружество». Самара. 2009.

10. Кузнецов М., Кунгуров Д., Матвеев М., Тарасов В. Входные цепи устройств РЗА. Проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений // Новости электротехники. 2006. № 6(42).
11. Кузнецов В.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Практикум / В.Н. Кузнецов. Издательство ТГУ. Тольятти 2014.
12. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО «НПП ЭКРА».
13. Малахов Д.В. Определение уровня электромагнитной помехи во вторичной цепи микропроцессорного терминала релейной защиты экспериментальным способом//
14. Никитин А.А. Микропроцессорные реле. Основы теории построения измерительной части// ООО НПП «Экра». Чебоксары. 2009.
15. Правила устройства электроустановок.// Министерство энергетики Российской Федерации. Санкт-Петербург. 2012.
16. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. Издательство «Наука». Москва. 1970.
17. СТО 56947007-29.240.044-2010 «Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства». ОАО «ФСК ЕЭС». 2010г.
18. «Инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО153-34.21.122-03. ОАО РАО «ЕЭС». 2003.
19. Чернышев А.И., Шиняков Ю.А. Особенности помеховых электромагнитных полей в ближней зоне излучения от импульсных преобразователей электрической энергии. // Проблемы энергетики. 2003. № 1-2.
20. Фриск В.В. Основы теории цепей. Учебное пособие. Издательство «Радио Софт». Москва. 2002г.

21. Филатов А.Н., Сизганова Е.Ю. Расчетные методы оценки электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики.// Вестник ИрГУ.№9 2015.
22. Фрид Ю.В., Козлов В.Д., Величко Ю.К. Электросветосигнальное оборудование аэродромов.// Издательство «Воздушный транспорт» 1988.
23. Халилов Ф.Х. Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения. Учебное пособие. Издание НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». Санкт-Петербург 2012г.
24. Шалин А.И. Об эффективности новых устройств РЗА // Энергетика и промышленность России. 2006. № 1(65).
25. Jurcik, J. Analysis of transient actions influence in power transformer// Jurcik. J, Gutten. M, Korenciak. D // Advances in Electrical and Electronic Engineering. – 2013. – Volume 9. – Number 2. – PP. 65-69.
26. Chraygane, M. Improved modeling of new three-phase high voltage transformer with magnetic shunts // M.Chraygane, N. El Ghazal // Archives of Electrical Engineering. – 2015. - Volume 64. - Issue 1. – PP. 157-172.
27. Sarhan, M.A. A New Lifetime Distribution and Its Power Transformation // M.A. Sarhan, T. Lotfi, D.C. Hamilton // Journal of Probability and Statistics. – 2014 – Volume 2014.- Article ID 532024.- PP. 1-14.
28. Brando G. A Distribution Power Electronic Transformer with MMC// G. Brando, B. Bova, A. Cervone. A. Del Pizzo, A. Dannier // Applied Sciences. – 2018 – PP. 1-12.
29. Abbas A. J. Modeling and Control of the Saturation's Transformer// A. J. Abbas, K. S. Gaeid, I. K. Salih // Tikrit Journal of Engineering Science. – 2013 – Vol 17.-No 1. – PP. 16-27.
30. Zamboti M. Software to manage transformers using intelligent electronic device // M. Z. Fortes, H.S. Fernandes, M. B. Moura, P.Guadalupe, N. C. Fernandes // Ingeniería e Investigación. – 2016 – V 36.-N 1. – PP. 85-89.

Приложение А

Принятые сокращения

ЗРУ–закрытое распределительное устройство	МТ – микропроцессорный терминал
ШОТ–шкаф оперативного тока	СЭС – система электроснабжения
РПН – регулирование под нагрузкой	ВЛ – воздушная линия электропередачи
КРУ–комплектное распределительное устройство	К.З. – короткое замыкание
ШЗТ–шкаф защиты трансформатора	ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
ТС–техническое средство	МОП – металл-окисел – проводник
УЗИП–устройство защиты от импульсных перенапряжений	ОРУ – открытое распределительное устройство
ПУЭ – правила устройства электроустановок	ОПУ – оперативный пункт управления
ОЗЗ – однофазные замыкания на землю	ЭМО – электромагнитная обстановка
ОПН – ограничитель перенапряжений	ЭМП – электромагнитная помеха
АЦП –аналогово-цифровой преобразователь	ВЧ – высокая частота
ЭМС – электромагнитная совместимость	НЧ – низкая частота
РЗАиТ – релейная защита и автоматика	

Приложение Б

План заземляющего устройства ЗРУ-10 кВ

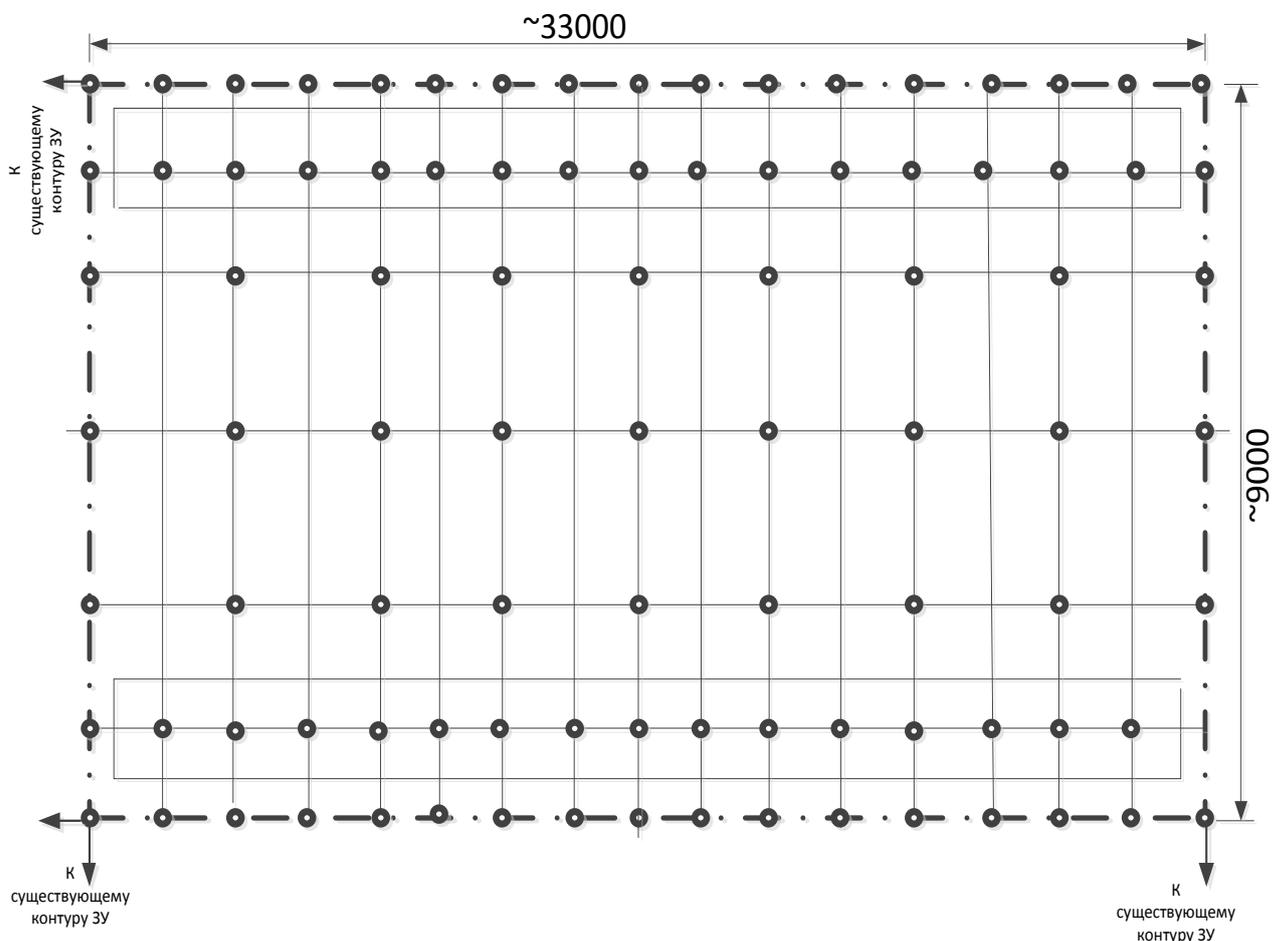


Рисунок Б.1 - План заземляющего устройства ЗРУ-10 кВ

Приложение В

Преобразователь интерфейса RS-485 в ТТЛ Д2700

ЭКРА | ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ЭКРА»

Блок преобразователя сигналов TTL-RS485 Д2700
Этикетка
ЭКРА.656116.395ЭТ

ШТРИХ-КОД ИЗДЕЛИЯ

1 Основные сведения об изделии и технические данные

1.1 Назначение
Блок преобразователя сигналов TTL-RS485 типа Д2700 (далее - блок) предназначен для двунаправленного преобразования сигналов интерфейса TTL в сигналы двухпроводного интерфейса RS485 с гальванической развязкой при организации локальной сети из терминалов серий БЗ2704, БЗ2502 (шкафов типов ШЗ2607, ШЗ2710), а так же приёма импульсов синхронизации точного времени с частотой 1 Гц (1PPS).

Блок выполнен в металлическом корпусе, имеет разъём TTL для подключения к терминалу и винтовой клеммник для подключения интерфейса RS485. Блок подключается к разъёму TTL терминалов защит серий БЗ2704, БЗ2502 и крепиться к задней плите терминалов при помощи скобы преобразователя и винтами. Предусмотрен проводник заземления, подключаемый с помощью винта к корпусу терминала в специально предусмотренном месте. Общий вид блока приведен на рисунке 1.

Питание блока осуществляется от внутреннего источника терминала защиты напряжением 5 В с допустимыми отклонениями $\pm 5\%$.
Вид климатического исполнения – УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

1.2 Основные технические данные и характеристики
Основные параметры и характеристики блока приведены в таблице 1.

Параметр	Значение
Количество каналов преобразования интерфейса TTL-RS485	1
Максимальная скорость передачи, бит/с, не выше	115200
Тип соединителя интерфейса RS485	винтовой клеммник
Диаметр подключаемых проводников, мм, не более	1×1,50 или 2×0,75
Линия связи интерфейса RS485	двухпроводная
Ток, потребляемый блоком по цепи 5 В, мА, не более	50
Ток, потребляемый блоком по входу канала синхронизации времени, мА, не более	5
Входное напряжение импульсов синхронизации времени, В	24 $\pm 20\%$
Ширина импульсов канала синхронизации, мкс, не менее	100
Средний срок службы, лет, не менее	20
Габаритные размеры блока, мм, не более	54×52×32
Масса блока, г, не более	150

1.3 Сведения о содержании драгоценных материалов и цветных металлов
Драгоценные материалы и цветные металлы в изделии не содержатся.

Примечание – Информация о содержании драгоценных материалов и цветных металлов в компонентах импортного производства отсутствует в технической документации на них.

Таблица 2 – Разъем «TTL»

Номер вывода	Назначение
1	Выход канала синхронизации
2	Передатчик
3	Приёмник
4	Корпус
5	
6	Общий (0 В)
7	Питание + 5 В
8	
9	

Таблица 3 – Разъем RS485

Номер вывода	Назначение
1	DATA+
2	Перемычка для подключения согласующего резистора
3	DATA-
4	Экран
5	Вход канала синхронизации
6	
7	

Рисунок 1 – Внешний вид, габаритные размеры и назначение выводов разъемов блока преобразователей типа Д2700

2 Указания по эксплуатации
Внимание: Подключение и отключение блока Д2700 должно производиться только при выключенном питании терминала!

Перед подключением блока необходимо открутить от втулки разъема TTL терминала проводник заземления. Освободившийся винт в дальнейшем не используется.

Установить блок в разъем TTL терминала и закрепить на нем сквозными винтами крепления блока, выходящими со стороны разъемов интерфейса RS485.

Закрепить угольник на корпусе терминала винтом М2.5 с соответствующими шайбами из комплекта поставки.

Закрепить винтом М2.5 на корпусе блока Д2700 в свободном от краски месте ранее открученный от разъема терминала проводник заземления.

Внимание: Заземление корпуса блока обязательно!

Подключение и отключение разъема интерфейса RS485 допускается производить без отключения питания терминала или вывода его из работы.

При организации локальной сети терминалов по двухпроводной линии связи с интерфейсом RS485 используется параллельное соединение блоков Д2700 в количестве не более 32 в одной линии связи. Для этого произвести объединение одноименных контактов разъема RS485 (Data+, Data-, Экран) экранированным кабелем типа витая пара с подключением к одной клемме разъема двух проводников. На конечном в линии связи преобразователе Д2700 установить перемычку разъема RS485 2-3 для подключения согласующего резистора.

Рисунок В.1 – Этикетка преобразователя интерфейса RS-485 в ТТЛ Д2700

Приложение Г

Расчет ЭМП в программе EMI analyzer

Порядок расчета ЭМП в программе EMI analyzer приведен на рисунках Г.1-Г.5.

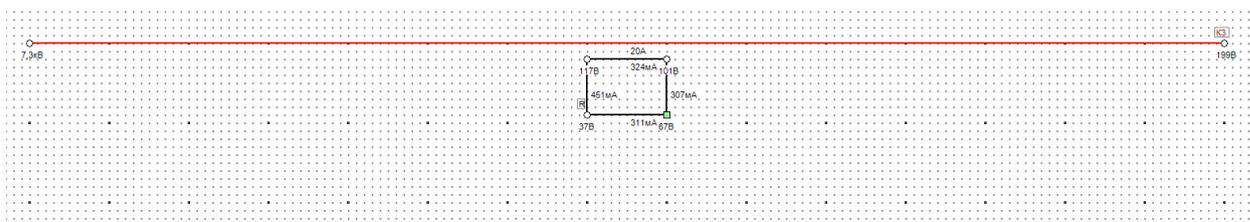


Рисунок Г.1 – Расчетная модель однофазного замыкания на землю

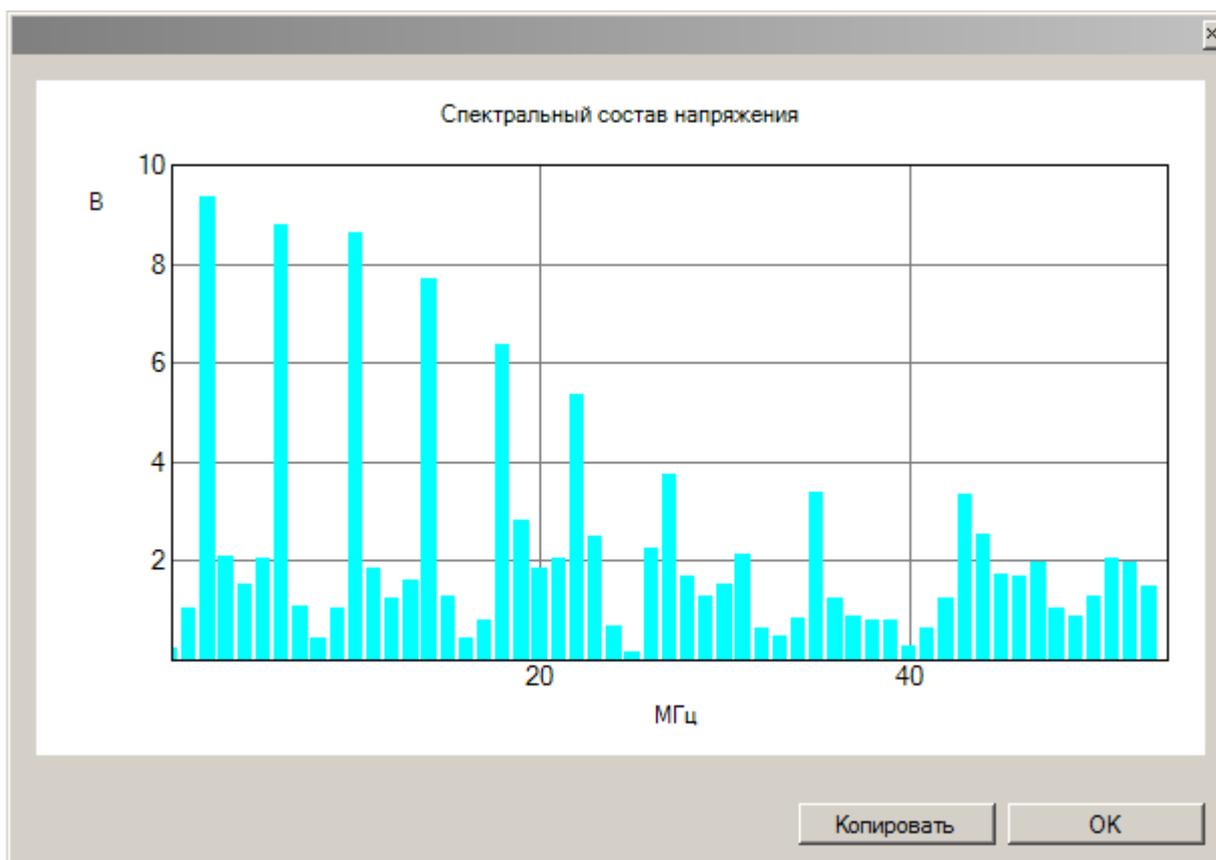


Рисунок Г.2 – Спектральный состав электромагнитной помехи

Продолжение приложения Г

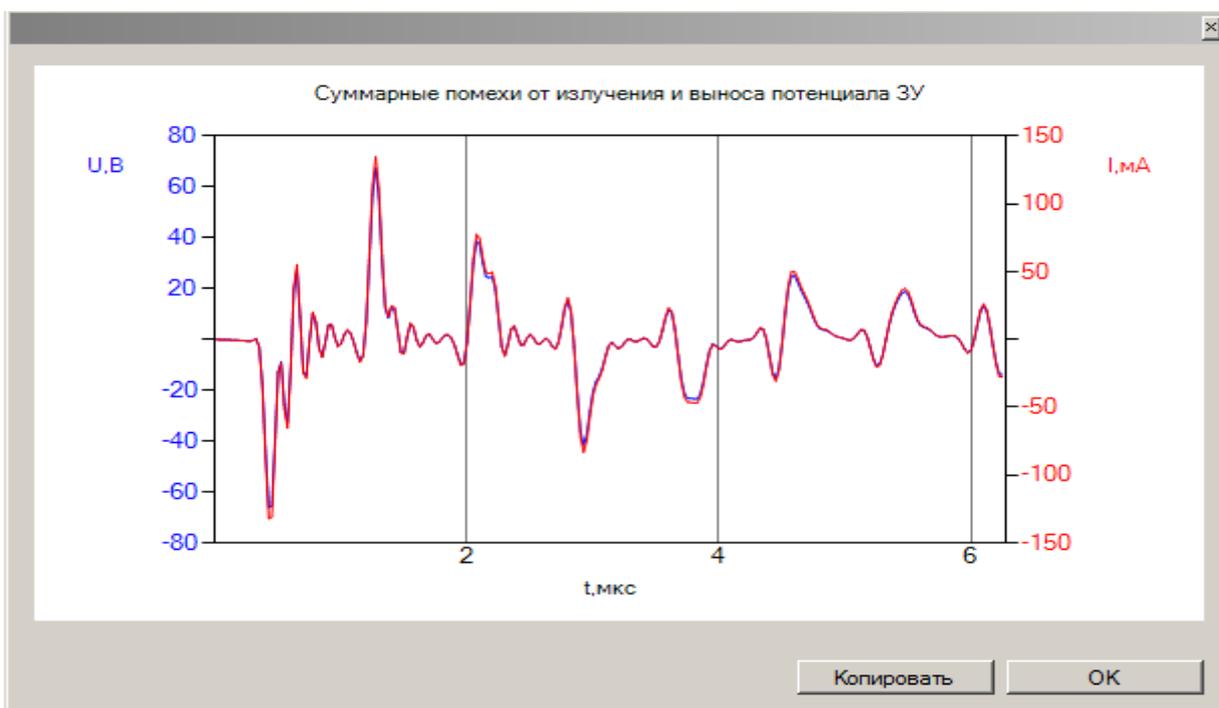


Рисунок Г.3 – Суммарные помехи от излучения и выноса потенциала ЗУ

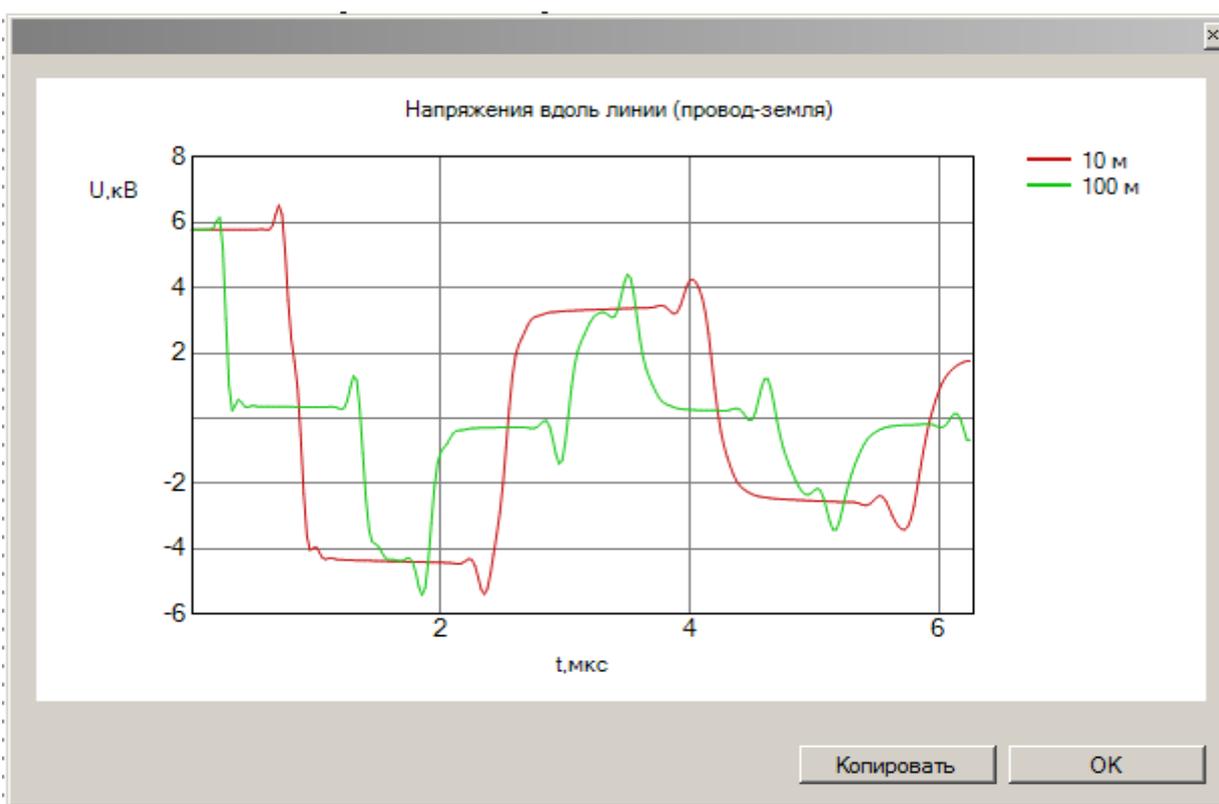


Рисунок Г.4 – Напряжение помехи вдоль провода первичного контура

Продолжение приложения Г

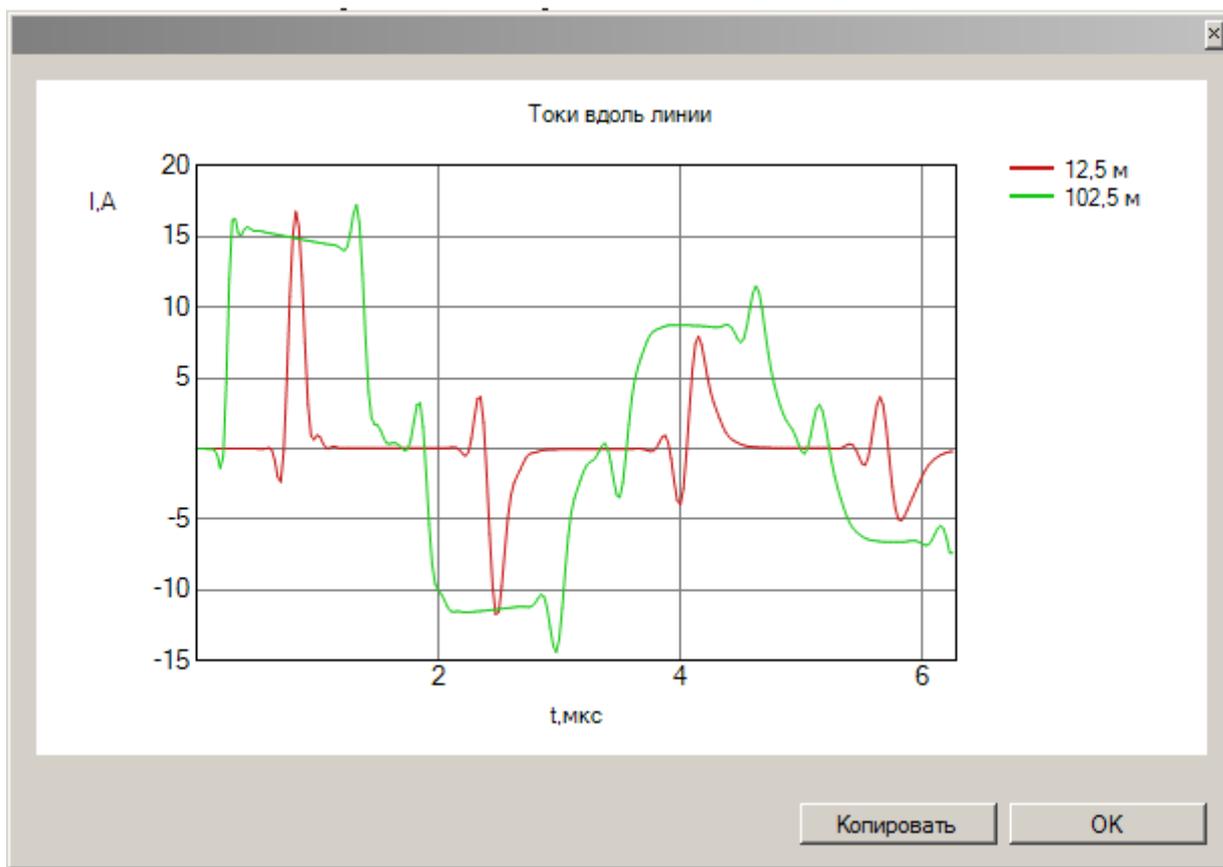


Рисунок Г.5 – Ток помехи вдоль провода первичного контура

Расчет ЭМП произведен в программе «EMI analyzer» демо-версии, которая ограничивает расчетную схему 5 линиями. Следовательно, расчетную схему можно представить в виде одной линии и контура. Красная линия, представляет собой первичную цепь 10 кВ с коротким замыканием в конце линии, расчетное $r_{кз} = 10 \text{ Ом}$.

Представлен спектральный состав ЭМП и амплитуда. ЭМП представляет собой электрический сигнал сложной формы, появляющийся во вторичной цепи, который может приводить к нарушению в работе устройства защиты, автоматики и управления.