

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

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование кафедры)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Перспективные методы обеспечения блокировки ПС 220 кВ «Левобережная» с применением новых типов датчиков»

Студент

В.В. Скаряднова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.И. Платов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 2017 г.

Тольятти 2017

Аннотация

Выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена перспективным методам обеспечения оперативной блокировки подстанции 220 кВ «Левобережная» с применением новых типов датчиков. Подстанция, на которой будет применяться система оперативной блокировки, находится в городе Тольятти.

В работе рассмотрены методы усовершенствования оперативной блокировки, требований и задач к её обеспечению, а также конструирование новых типов датчиков тока и заземления. Произведен выбор конструкции датчиков тока. Рассмотрена разработка блокировки, запрещающая подачу питания на заземляющую шину и разработка датчика заземления шины. Выполнено описание экспериментальных исследований датчиков и результаты.

Выпускная квалификационная работа бакалавра выполнена в объеме 46 листов, содержит 22 рисунка, 1 таблицу, 6 чертежей, выполненных на формате А1.

Abstract

The title of the graduation work is Perspective Methods of Providing Operational Blocking of the 220 kV Substation with the Use of New Types of Sensors.

The object of the graduation project is the Levoberezhnaya 220 kV substation. The aim of the work is to improve the operational blocking, the introduction of new current and ground sensors into the substation control system to ensure reliable operation of the transformer substation.

The work touches upon the following issues: the issue of the prospects of using sensors at the substation and their implementation at other similar facilities. Particular attention is paid to current sensors. Based on the analysis of the state of the existing blocking system, directions for its improvement have been determined, and constructive approaches to the manufacture of sensors have been substantiated. Then, with the help of calculations, the designs of two types of sensors are finally defined and measurement schemes developed. An important feature of the work is a significant amount of experimental research.

The thesis consists of an explanatory note on 46 pages, introduction, including 47 figures, 1 table, the list of 20 references including 6 foreign sources, and the graphic part on A1 sheets.

Содержание

Введение	7
1 Подстанция «Левобережная» и направления её совершенствования	8
1.1 Задачи трансформаторных подстанций.....	8
1.2 Характеристика подстанции «Левобережная».....	13
1.3 Направления совершенствования подстанции.....	15
2 Система оперативной блокировки подстанции.....	17
2.1 Требования руководящих документов к обеспечению оперативной блокировки.....	17
2.2 Задачи оперативной блокировки.....	18
2.3 Проблемы системы оперативной блокировки и пути их решения.....	20
3 Разработка новых типов датчиков для системы оперативной блокировки.....	23
3.1 Обоснование требований к новым датчикам.....	23
3.2 Выбор конструкции датчиков тока для ЛЭП.....	24
3.2.1 Изолированный соленоид с проводной информационной линией.....	24
3.2.2 Специальный трансформатор с замкнутым магнитопроводом.....	30
3.3 Измерительные схемы для описанных трансформаторов.....	31
3.3.1 Базовая схема датчиков.....	31
3.3.2 Схема датчика тока с импульсным выходом.....	33
3.4 Разработка датчика заземления шины.....	36
4 Экспериментальные исследования датчиков.....	40
4.1 Организационно – технический аспект эксперимента.....	40
4.2 Результаты экспериментальных исследований.....	43
4.2.1 Измерение тока в имитаторе фрагмента ЛЭП	43

4.2.2 Испытание измерительных трансформаторов	43
4.2.3 Испытания датчика заземления шины.....	44
Заключение.....	45
Список использованных источников.....	46

Введение

Обеспечение надежной работы трансформаторной подстанции является важной задачей, поскольку любые сбои в данной области приводят к тяжелым последствиям для промышленных объектов и граждан. Одной из причин таких сбоев является человеческий фактор, то есть ошибочные действия персонала. Чтобы не допустить подобных происшествий применяется система оперативной блокировки.

Действующая система оперативной блокировки в целом достаточно эффективна, однако и она может быть усовершенствована. В частности, могут быть введены в систему управления подстанции новые датчики тока и заземления, конструированию которых посвящена настоящая работа.

На основе анализа состояния существующей системы блокировки определены направления ее совершенствования, обоснованы конструктивные подходы к изготовлению датчиков. Далее с помощью расчетов окончательно определены конструкции двух типов датчиков и разработаны измерительные схемы. Важной особенностью работы является значительный объем экспериментальных исследований.

Полученные научные результаты могут найти применение как на подстанции «Левобережная», так и на других объектах Единой энергетической системы России.

1. Подстанция «Левобережная» и направления её совершенствования

1.1 Задачи трансформаторных подстанций

При производстве, передаче и распределении электроэнергии приходится решать противоречивую задачу выбора оптимального напряжения. С одной стороны, напряжение должно быть, как можно выше, чтобы ток был, соответственно, меньше и провода тоньше, легче и дешевле. С другой стороны, повышение напряжения неизбежно ведет к повышению вероятности электрического пробоя. Чтобы избежать этого, требуется более толстая, тяжелая и дорогая изоляция. Таким образом, напряжение выбирается как компромисс между указанными факторами. [13]

Генераторы электростанций выдают напряжение порядка 16 – 24 кВ. Их обмотки выполнены по достаточно сложной технологии. Для передачи по магистральным линиям электропередачи (ЛЭП) используется высокое напряжение - до 1150 кВ, а в ближайшем будущем предполагается дойти до 1,5 мегавольт. Верхний предел определяется проблемой возникновения коронного разряда и необходимостью применения укрупненных конструкций опор, обеспечивающих достаточный пространственный разнос проводов во избежание пробоя. Между номиналами напряжения генераторов электростанций и магистральными ЛЭП имеется промежуточное звено, в котором используются напряжения 110, 220, 330, 500 и 750 кВ.

Преобразование напряжения осуществляется на трансформаторных подстанциях. В основе их работы, как это следует из названия, лежат трансформаторы. Внешний вид типового силового трансформатора современной подстанции показан на рисунке 1.1.

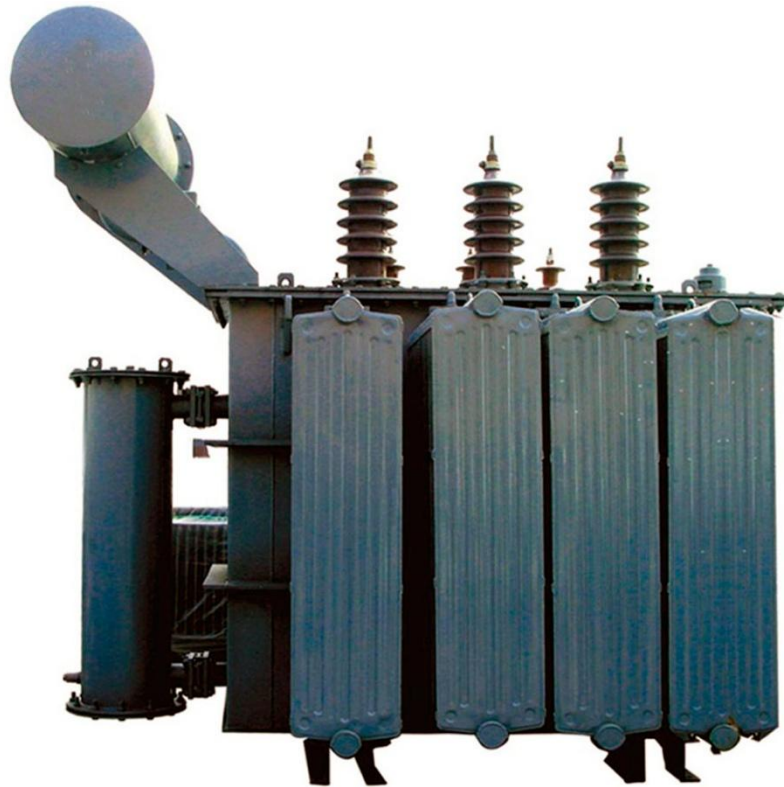


Рисунок 1.1 – Силовой трансформатор

Поскольку в дальнейшем в данной работе предполагается разработка специального измерительного трансформатора, кратко рассмотрим устройство и принцип работы изделий такого рода.

Простейший трансформатор схематично показан на рисунке 1.2.

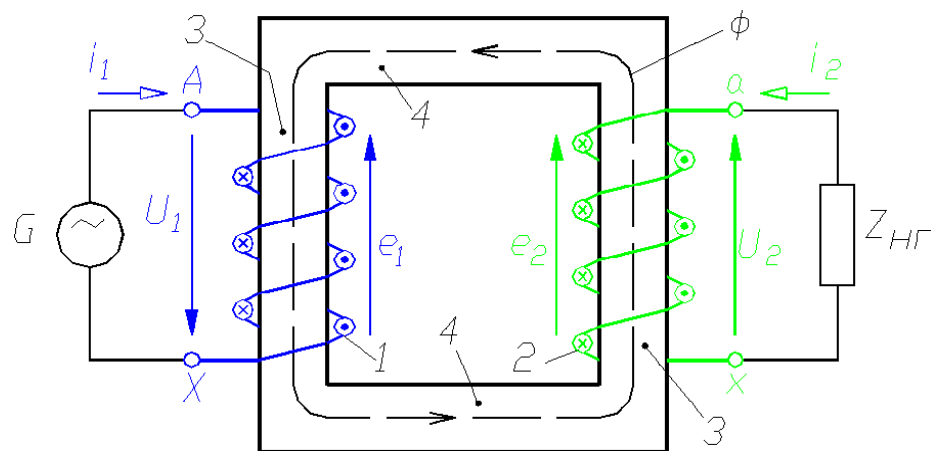


Рисунок 1.2 – Устройство трансформатора

Он состоит из сердечника и пары обмоток – первичной и вторичной. Обычно сердечник изготавливают из пластин специальной трансформаторной стали толщиной менее миллиметра. Пластинчатая конструкция нужна потому, что в сплошном металле переменный магнитный поток порождает паразитные токи, которые его нагревают. В высокочастотных трансформаторах потери в стали слишком велики и сердечники изготавливают из высокоомных ферромагнетиков, чаще всего, из феррита.

С точки зрения разработки собственного трансформатора, отметим, что конструкция магнитопровода может быть самой различной, главное – чтобы он обладал способностью передавать энергию магнитного поля из первичной обмотки во вторичную. В частности, мы намерены исследовать возможность изготовления трансформатора с магнитопроводом в виде обмотки из магнитомягкой стальной проволоки [2].

Обмотки W_1 и W_2 изготавливают из медного или алюминиевого изолированного провода. Одна из них подключается к источнику переменного тока и называется первичной. Другая, соответственно, называется вторичной. С нее снимается преобразованное напряжение. Отношение количества витков в этих обмотках называется коэффициентом трансформации, как показано на формуле 1.1.

$$K=W_1/ W_2 \quad (1.1)$$

Важно иметь в виду, что размеры трансформатора определяют его габаритную мощность. Это объясняется явлением магнитного насыщения сердечника, которое означает завершение поляризации структурных элементов ферромагнетика. В большом сердечнике таких элементов больше и запас магнитной энергии тоже больше.

Трансформаторные подстанции бывают повышающими и понижающими, они могут располагаться в специальных помещениях, на огороженной открытой местности, на мачтовых опорах. Наиболее распространенными являются

комплектные трансформаторные подстанции. Они находятся в конце пути электроэнергии к потребителям и преобразуют напряжение 10 или 6 кВ в стандартную трехфазную сеть 400 В.

Особо следует отметить преобразовательные подстанции. Они преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот. Это необходимо для сопряжения различных электрических цепей. Особым классом подстанций являются тяговые. Они обеспечивают магистральный и городской транспорт электроэнергией с требуемыми параметрами.

Комплектация трансформаторных подстанций определяется их назначением. В зависимости от количества трансформаторов здание подстанции может включать два или три отсека, в которых устанавливается основное и вспомогательное оборудование. В его состав обычно входят:

- Силовые трансформаторы
- Устройства ввода и вывода воздушных и кабельных линий
- Распределительные устройства
- Система электропитания для собственных нужд.
- Система защиты и автоматики, включающая систему оперативной блокировки,
- Система заземления и молниезащиты
- Вспомогательные, бытовые, хозяйственные и др. системы

Трансформаторные подстанции могут содержать один, два или три силовых трансформатора, быть подключенными к нескольким линиям электропередачи, обеспечивать электроэнергией различное число потребителей. При этом возникает необходимость выполнения множества соединений. Для их выполнения применяются распределительные устройства. Они могут иметь открытое и закрытое исполнение. Силовые проводники открытых распределительных устройств не имеют защиты от воздействия внешних факторов, а закрытые монтируются в помещениях или металлических шкафах.

Для управления режимами работы оборудования подстанции нужно, прежде всего, иметь информацию о токах и напряжениях в различных цепях.

Для этого применяются трансформаторы напряжения и тока. Их внешний вид представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Трансформаторы напряжения и тока.

Трансформаторы напряжения просты в теории, но на практике из-за больших измеряемых напряжений имеют ряд технологических особенностей. Дело в том, что при коэффициенте трансформации в несколько тысяч погрешность измерения слишком велика. Поэтому применяются каскадные конструкции, делители напряжения и другие схемы, обеспечивающие линейную зависимость выходного напряжения от входного. Для непосредственной передачи величины измеренного напряжения по линии дистанционного управления промышленность выпускает специальные преобразователи сигналов.

Трансформаторы тока позволяют измерять большие токи, непосредственное измерение которых невозможно, а также обеспечивают гальваническую развязку цепей. Они бывают встроенные, опорные, шинные, втулочные, съемные и другие. Наиболее распространенные – проходные, которые можно использовать в качестве ввода. Для их сопряжения с каналами передачи данных также выпускаются преобразователи сигналов. Важно отметить, что, отличие от трансформаторов напряжения, подключаемых параллельно, трансформаторы тока включаются в разрыв провода, что налагает существенные ограничения на количество таких устройств на подстанции. Этот факт усложняет процесс управления подстанцией, поскольку ограничивает число точек измерения.

1.2 Характеристика подстанции «Левобережная»

Подстанция 220 кВ Левобережная с первоначальной (до реконструкции) мощностью 480 МВА эксплуатируется с 1961 года и питает электроэнергией три городских района, промышленную зону города Тольятти, ряд социальных объектов и предприятий: ОАО «ТольяттиКаучук», ОАО «Электротехнический завод», ТООЗ, ОАО «Волгацеммаш», ТЭЦ Волжского автозавода.

С 2009 по 2013 год на подстанции 220 кВ Левобережная была выполнена реконструкция в рамках инвестиционной программы Федеральной сетевой компании. Целью реконструкции было повышение надежности энергоснабжения потребителей города Тольятти, сельскохозяйственных и промышленных объектов Самарской области. Реконструкция включала модернизацию энергообъекта и увеличение его мощности. В процессе выполнения этих работ был осуществлен монтаж оборудования комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ), а также созданы условия для осуществления присоединения новых потребителей региона к магистральным сетям.

Как известно, самыми прогрессивными коммутационными устройствами считаются вакуумные, однако на напряжение 220 кВ они не изготавливаются. Поэтому на подстанции были установлены элегазовые аппараты. Внешний вид КРУЭ представлен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Распределительные устройства с элегазовой изоляцией

Реконструированная подстанция занимает в 3 раза меньше площади, чем обычные, равные по мощности, энергообъекты со стандартной схемой размещения оборудования, так как на ней применяется КРУЭ, которое размещено внутри здания, защищённое от воздействия внешней среды. Кроме того, подстанция оснащена современным оборудованием, которое осуществляет распределение и приём электроэнергии от линий электропередач к трансформаторам.

В здании, где размещено оборудование КРУЭ, находятся трансформаторы тока и напряжения, элегазовые выключатели, ограничители перенапряжений и разъединители, трансформаторы собственных нужд, устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также системы связи.

Также в ходе реконструкции подверглись значительным изменениям внешние объекты подстанции. В частности, было построено здание общеподстанционного пункта управления (ОПУ), установлена система шин 220 кВ, введены в работу 3 ячейки открытого распределительного устройства (ОРУ) 220 кВ. Дополнительно смонтировано внешнее ограждение, а также построены здание насосной станции, резервуар для маслосборника и два пожарных резервуара. Главный из перечисленных объектов – ОРУ изображен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – ОРУ 220 кВ

Благодаря реконструкции и техническому переоснащению, подстанция увеличила свою мощность до 500 МВА. Значительно повысилась надежность подстанции, усовершенствовалась система управления ей.

1.3 Направления совершенствования подстанции

В настоящее время в результате проведенной реконструкции подстанция находится в очень хорошем техническом состоянии. Для определения направлений ее совершенствования были проведены встречи с руководством объекта. Было выяснено, что наиболее сложные проблемы находятся в системе оперативной блокировки, поскольку ошибки персонала в отдельных случаях не удастся гарантированно предотвратить. Основных направлений совершенствования определено два.

Первое направление связано с увеличением количества датчиков тока. Как было отмечено выше, трансформаторы тока включаются в разрыв провода и их количество должно быть ограничено. Требуются датчики тока, которые не требуют разрыва провода и могут устанавливаться в любом нужном месте.

Второе направление связано с ошибками персонала, заключающимися в подаче высокого напряжения на заземленную шину. При выполнении работ

шину, как известно, заземляют. Подключенный к ней трансформатор напряжения регистрирует отсутствие напряжения, но не может зафиксировать факт заземления. Требуется разработать устройство, которое способно решить эту проблему.

2. Система оперативной блокировки подстанции

2.1 Требования руководящих документов к обеспечению оперативной блокировки

Обеспечение надежной работы подстанции 220 кВ предполагает принятие всех возможных мер по предотвращению аварийных ситуаций в результате неправильных действий персонала. Человеческий фактор по-прежнему остается основной причиной коротких замыканий и других чрезвычайных происшествий такого рода. Основным средством защиты от неправильных коммутаций является система оперативной блокировки.

Данная система организована на основании «Типовой инструкции по эксплуатации и оперативному обслуживанию оборудования подстанций в филиалах ОАО «ФСК ЕЭС» - МЭС и ПМЭС» [13].

На основе этой инструкции разработаны частные руководящие и нормативно-технические документы в филиалах ОАО «ФСК ЕЭС» - МЭС и ПМЭС для операторов трансформаторных подстанций. На местах названная конструкция была дополнена различными организационными и техническими требованиями в соответствии с местными условиями эксплуатации оборудования и его состоянием.

Задача системы оперативной блокировки – воспрепятствовать неправильным действиям персонала, которые могут повлечь за собой возникновение аварийной ситуации. В основном это связано с выполнением всевозможных действий с коммутационными аппаратами. Практика показывает, что чаще всего проблемы возникают при манипуляциях с разъединителями, поскольку их переключение допускается при ненулевых токах в цепи.

2.2 Задачи оперативной блокировки

Оперативная блокировка должна исключать:

1. Коммутацию токов, величина которых больше предусмотренных технической документацией значений;
2. Коммутацию несинхронных цепей;
3. Коммутацию заземляющих ножей на проводники и участки, находящиеся под напряжением;
4. Подключение разъединителей на заземленных участках шин;
5. Операции с разъединителями под нагрузкой, кроме специально оговоренных случаев;
6. Заземление участка цепи, соединенного с другими участками, находящимися под напряжением;
7. Подачу напряжения на заземленный участок цепи.

Выполнение указанных задач достигается следующими техническими мерами. Выключатели отделяются от других участков цепи разъединителями, имеющими механическую блокировку с заземляющими ножами, так, чтобы заземляющие ножи одной стороны выключателя могли включаться лишь при отключении разъединителей с обеих сторон [7].

Для разъединителей с пофазной работой блокировка выполняется так, что манипуляции с разъединителем каждой фазы невозможны при включенных заземляющих ножах на других фазах. Это обусловлено наличием связи через трансформаторные обмотки.

Оперативная блокировка для сборных шин выполняется так, чтобы исключалось включение заземляющего ножа, если включен хотя бы один шинный разъединитель...

Блокировки КРУ должны эффективно запрещать включать заземляющие ножи сборной шины, если тележки выключателей находятся в рабочем положении. Также блокировка в КРУ предусматривает предотвращение вкатывания тележки выключателя в активном состоянии

Таким образом, наиболее острые проблемы обеспечения оперативной блокировки связаны с применением разъединителей и заземляющих ножей. Их алгоритмы работы показаны на рисунках 2.1 и 2.2.

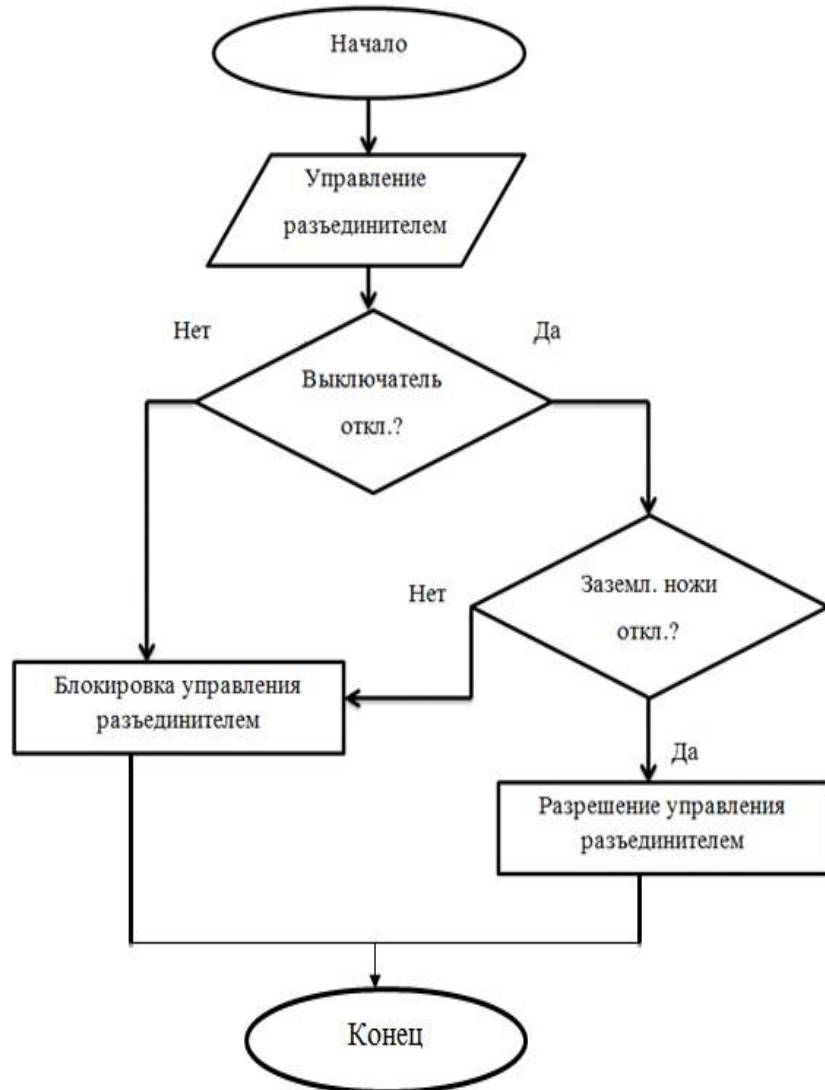


Рисунок 2.1 – Алгоритм управления разъединителем

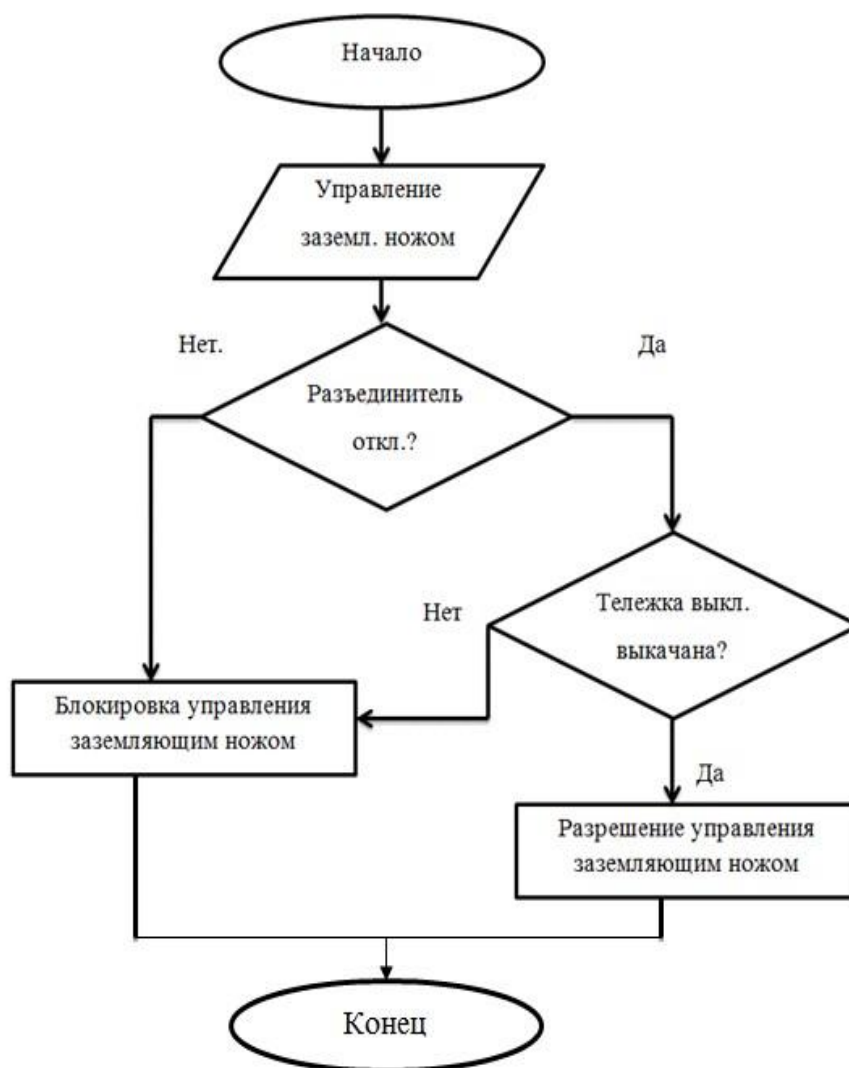


Рисунок 2.2 – Алгоритм управления заземляющим ножом

2.3 Проблемы системы оперативной блокировки и пути их решения

На трансформаторной подстанции «Левобережная» в 2013 году была проведена реконструкция, в результате которой она была укомплектована новым оборудованием, в том числе и датчиками системы оперативной блокировки. В целом данная система работает нормально, однако, по мнению руководства подстанции, может быть усовершенствована [10].

В процессе прохождения практики на указанном объекте в ходе изучения проблем его развития были проведены рабочие совещания с начальником ПС и ведущим специалистом. Целью совещаний было выявление слабых мест в действующей системе оперативной блокировки. По мнению руководства, таких мест два и оба они связаны с проявлением человеческого фактора.

Первое проблемное место – недостаточно полный контроль включения нагрузок. Подключение нагрузки преимущественно контролируется с помощью трансформаторов напряжения. Это логично, потому что они, в отличие от трансформаторов тока, подключаются параллельно, а не в разрыв цепи. Однако, кроме напряжения, часто бывает необходимо контролировать и ток. Дело в том, что при наличии напряжения отдельные цепи могут переключаться, если ток в них не превышает некоторый установленный порог. Принятие решения персоналом в таких случаях иногда приводит к ошибкам, что обуславливает необходимость внедрения соответствующей автоматики. Использование типовых трансформаторов тока ограничено, прежде всего, способом их включения - в разрыв линии электропередач. Для ЛЭП напряжением 220 кВ и током около 1000 А каждый разрыв создает проблемы и не может выполняться там, где это удобно для персонала. Количество таких разрывов и, следовательно, трансформаторов тока сведено к минимуму. Вместе с тем, контроль не только факта включения линии, но и ее реальной нагрузки позволит существенно повысить надежность работы подстанции [6].

Есть еще одно нежелательное свойство трансформаторов тока – они передают свои измерительные сигналы по проводам. Но при этом нужно иметь в виду, что уровень электромагнитных полей на территории подстанции очень высок и их фазовые соотношения непредсказуемы. По этой причине все достаточно длинные проводники будут перегружены паразитными электрическими сигналами, на фоне которых полезный сигнал может затеряться.

Таким образом, первая задача состоит в разработке датчиков, позволяющих измерять ток в любой точке ЛЭП без снижения надежности ее работы. Такие датчики должны исключать возможность электрического пробоя и распространение высокого напряжения по сигнальным цепям в нештатных ситуациях. В соответствии с правилами работы ЛЭП, датчики не должны иметь с ними гальванической связи, а также зависеть от внешнего или автономного питания.

Вторая задача связана с возможностью ошибочной подачи высокого напряжения на заземленную шину, что считается серьезным чрезвычайным

происшествием. Датчик заземления должен определять включение заземления перед подачей напряжения, то есть в обесточенном состоянии шины.

Третья задача является следствием необходимости решения первой и состоит в моделировании фрагмента ЛЭП, по которому протекает значительный ток – до 1000 А. Ее актуальность обусловлена, во-первых, обилием источников мощных электромагнитных полей на территории подстанции, а во-вторых – сложным характером зависимости напряженности электрического и магнитного поля в ближней зоне. По этим причинам с большой вероятностью результаты расчетов могут недопустимо отличаться от реальных величин.

3. Разработка новых типов датчиков для системы оперативной блокировки

3.1 Обоснование требований к новым датчикам

При определении требований будем исходить, прежде всего, из перспективы использования датчиков на конкретной подстанции «Левобережная». Вместе с тем, целесообразно предусмотреть их внедрение на других аналогичных объектах. Поэтому предпочтительны технические решения универсального типа, пригодные для адаптации к другим условиям [6].

Датчик тока должен обеспечивать измерение силы переменного тока в широких пределах и исключать возникновение различного рода замыканий, а также влияние посторонних электрических цепей. Его подключение должно выполняться без разрыва проводника, простыми средствами без применения сложного технологического оборудования. Он должен обеспечивать как простое наблюдение за фактом коммутации, так и совместную работу с вычислительной техникой автоматизированных рабочих мест. Передача информации от датчика к потребителю должна быть абсолютно безопасной в штатных и аварийных ситуациях.

Датчик должен быть энергонезависимым, для чего эффективность его электромагнитной связи с проводом должна быть достаточной, чтобы обеспечивать себя энергией, получаемой от ЛЭП. С точки зрения передачи информации должны быть исследованы варианты использования радиочастотного и оптического каналов.

Датчик заземления предназначен для фиксации факта соединения шины с заземляющим устройством. Он должен формировать слабый измерительный сигнал, позволяющий до подачи высокого напряжения на шину определить, заземлена шина или нет [14].

К шине постоянно подключен измерительный трансформатор 220 кВ/100В. Поэтому в основу работы датчика предполагается положить принцип измерения добротности контура, образованного вторичной обмоткой этого

трансформатора и конденсатором, кратковременно подключаемым измерительной схемой.

3.2 Выбор конструкции датчиков тока для ЛЭП

Особых требований к точности измерения тока нет, так как для принятия решений требуется скорее качественная оценка, чем количественная. На первом этапе требования к точности задавать не будем, поскольку, предположительно, моделирование фрагмента ЛЭП позволит оценить ее с большей достоверностью.

Учитывая, что питание датчика извне недопустимо, а от собственного источника проблематично и ненадежно, рассмотрим возможность использования электромагнитного поля в ближней зоне для питания датчика. Для этого датчик должен работать по принципу антенны, сигнал от которой будет использоваться не только как измеряемая величина, но и как источник электроэнергии.

Антенны бывают двух типов – электрического поля и магнитного. В ближней зоне из-за высокого уровня напряженности электромагнитного поля могут работать оба типа, однако, магнитная антенна в виде катушки более компактна, чем диполь или штырь, поскольку последние должны быть соизмеримы с длиной волны.

Используемые на подстанции провода АС-500/64 рассчитаны на максимальный ток 945 А. Примем верхний предел измеряемого тока для нашего датчика равным 1000 А.

3.2.1 Изолированный соленоид с проводной информационной линией

Для предварительной оценки предположим, что наш датчик представляет собой соленоид, расположенный в непосредственной близости от провода ЛЭП.

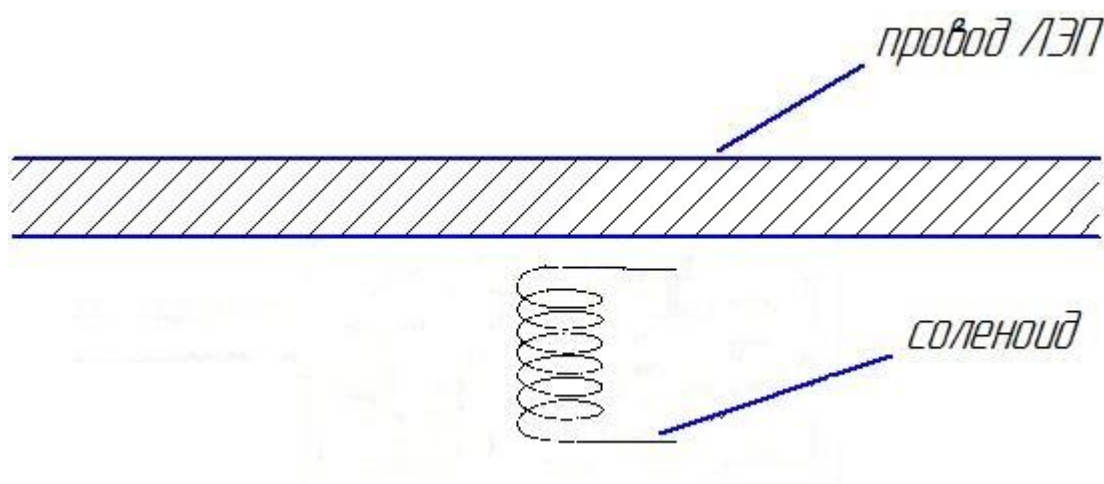


Рисунок 3.1 – Исходный вариант датчика тока

Рассчитаем ЭДС, которую при различных реальных исходных данных может навести в нем максимальный ток 1000 А.

Однако, прежде чем приступать к расчетам, оценим их потенциальную точность. Для этого проанализируем особенности наших условий измерения. Как известно, электромагнитное поле частотой 50 Гц, будучи формально переменным, имеет длину волны 60000 км. Реально его следует рассматривать как квазистатическое. Но при этом необходимо иметь в виду, что в ближней зоне, то есть на расстояниях, многократно меньших длины волны, поле еще не полностью сформировалось. В нем кроме составляющей, убывающей пропорционально расстоянию в первой степени, есть компоненты, затухающие пропорционально расстоянию во второй и третьей степени. Приведенные факты не позволяют выполнить точный расчет энергетических характеристик этого поля. Следовательно, на окончательном этапе нужно будет провести экспериментальные исследования теоретически обоснованных вариантов датчиков. Однако, для предварительной оценки практический интерес представляет расчет напряженности магнитного поля без учета наиболее быстро убывающих составляющих.

Основной характеристикой магнитного поля является его напряженность H или индукция B , которые связаны известным соотношением, выражение 3.1.

$$B = \mu H, \quad (3.1)$$

где μ - магнитная проницаемость среды.

Для воздуха μ можно считать равным магнитной проницаемости вакуума

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Прежде, чем определять расстояние, на котором датчик будет располагаться от провода ЛЭП, необходимо оценить возможность электрического пробоя этого расстояния. В таблице 3.1 приведены значения пробойного напряжения для различных сред.

Таблица 3.1 Электрическая прочность материалов и воздуха (напряжение пробоя на мм толщины).	
Материал	Епр, кВ/мм
Воздух сухой	2
Воздух влажный	0,1 и, возможно, ниже
Дерево сухое	4
Парафин	25
Плексиглас	18
Полистирол	30
Полиэтилен	40
Резина	20
Слюда	100
Стекло	25
Этиленвинилацетат = ЭВА = сэвилен	33-35
Фарфор электротехнический	20

Из таблицы 3.1 следует, что в нашем случае целесообразно воспользоваться полиэтиленом в качестве изоляционного материала. Даже сантиметровый слой этого диэлектрика надежно защитит от пробоя при напряжении 220 кВ. Оценим в первом приближении эффективность работы магнитной антенны в виде соленоида в полиэтиленовой изоляции, расположенного вблизи провода ЛЭП, схематично показанного на рисунке 3.2.

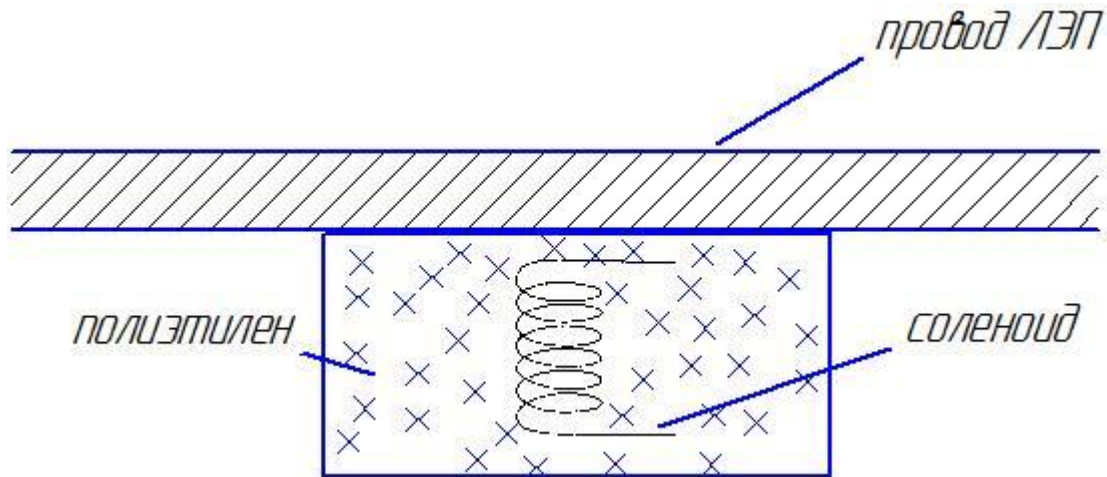


Рисунок 3.2 – Датчик в полиэтиленовой изоляции

Величина магнитной индукции определяется известным выражением по формуле 3.2.

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi r} I \quad (3.2)$$

где I – ток в проводнике, r – расстояние до датчика, μ – относительная магнитная проницаемость (для полиэтилена $\mu = 2,3$).

Для максимального тока 1000 А в среде полиэтилена на расстоянии 10 мм получим величину магнитной индукции по формуле 3.3.

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi r} I = \frac{2,5 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3}{2\pi \cdot 10^{-2}} = 0,05 \text{ Тл} \quad (3.3)$$

Для расчета ЭДС индукции воспользуемся формулой 3.4

$$\varepsilon = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.4)$$

где $\psi = N B S$ – поток магнитной индукции через контур из N витков сечением S .

Это выражение можно записать в форме 3.5.

$$\varepsilon = NS \frac{dB}{dt} \quad (3.5)$$

Магнитная индукция для тока, изменяющегося с промышленной частотой 50 Гц изменяется от максимального значения до нуля за четверть периода, т.е. за 5 мс. Следовательно, $dB/dt = 1$ Тл/с.

Примем сечение контура равным $10 \text{ см}^2 = 0,001 \text{ м}^2$ и рассчитаем ЭДС для контура из 1 витка, чтобы выбрать необходимое количество витков для датчика. Для рассчитанной выше скорости изменения магнитной индукции на расстоянии 10 мм от провода в среде полиэтилена получим значение ЭДС 0,001 В. Тогда для получения на выходе катушки напряжения 1 В она должна содержать 1000 витков.

Предполагая в дальнейшем использование обычных КМОП микросхем 561 серии, будем исходить из напряжения питания датчика от 3 до 15 в. Это соответствует от 3000 до 15000 виткам в контуре. Величина с точки зрения практической реализации не вполне приемлемая, поскольку необходимо еще учесть влияние сопротивления такой катушки и наводки от других источников электромагнитного поля.

Таким образом, первую гипотезу о возможности реализации датчика тока в виде соленоида в среде полиэтиленовой изоляции на расстоянии 10 мм от провода следует считать непригодной из-за низкой эффективности. Для получения более высоких значений ЭДС катушку нужно приблизить к проводу вплотную, однако это может привести к пробоем между проводом ЛЭП и низковольтными цепями измерительной аппаратуры.

Выходом из такой ситуации может быть отказ от проводников в цепях передачи измеряемого сигнала к аппаратуре его обработки. Это возможно лишь при использовании оптоволоконной линии передачи информации. При этом датчик может располагаться на любом расстоянии от провода ЛЭП.

Для реализации такого подхода необходим датчик, вырабатывающий за счет излученного проводом ЛЭП магнитного поля достаточно электроэнергии для работы светодиода, передающего световой сигнал в оптоволокно. В насто-

ящей работе нет необходимости построения оптоволоконной линии связи, поэтому упростим задачу до обеспечения достаточно яркого свечения светодиода за счет наведенного в катушке магнитного поля. Это программа-минимум. Желательно, для большей точности измерения тока ЛЭП обеспечить работу электронной схемы, модулирующей световой сигнал пропорционально силе тока в линии.

По своей физической сути датчик данного типа является трансформатором. Предполагается исследовать два варианта его реализации, продиктованные возможностью и удобством размещения датчика на линии.

Первая конструкция заключается в использовании соленоида, подобного рассмотренному выше, но с ферромагнитным сердечником. Наводимая в катушке ЭДС должна быть достаточной для питания отдельного светодиода или, если возможно, электронной схемы, модулирующей излучение светодиода. Этот вариант поясняется рисунком 3.3.

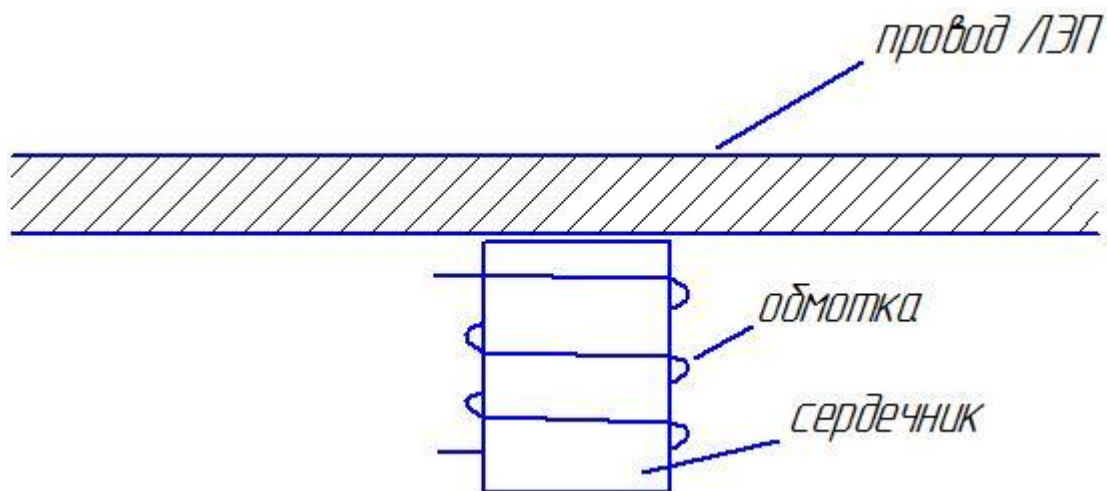


Рисунок 3.3 – Датчик тока в виде соленоида с сердечником

Недостатком такой конструкции может оказаться недостаточная эффективность при измерении не слишком больших токов, поскольку магнитопровод в данном случае разомкнут. Однако, при токах в 1000А и более этот недостаток может стать преимуществом, так как естественным образом ограничит вырабатываемую датчиком мощность и упростит задачу обеспечения защиты электронной схемы.

3.2.2 Специальный трансформатор с замкнутым магнитопроводом

Для случаев измерения достаточно слабых токов, при которых разрешены переключения с помощью разъединителей, исследуем еще один вариант. Вторая конструкция представляет собой изолированную катушку провода, которая примотана к проводу ЛЭП магнитомягкой стальной проволокой, как это изображено на рисунке 3.4.

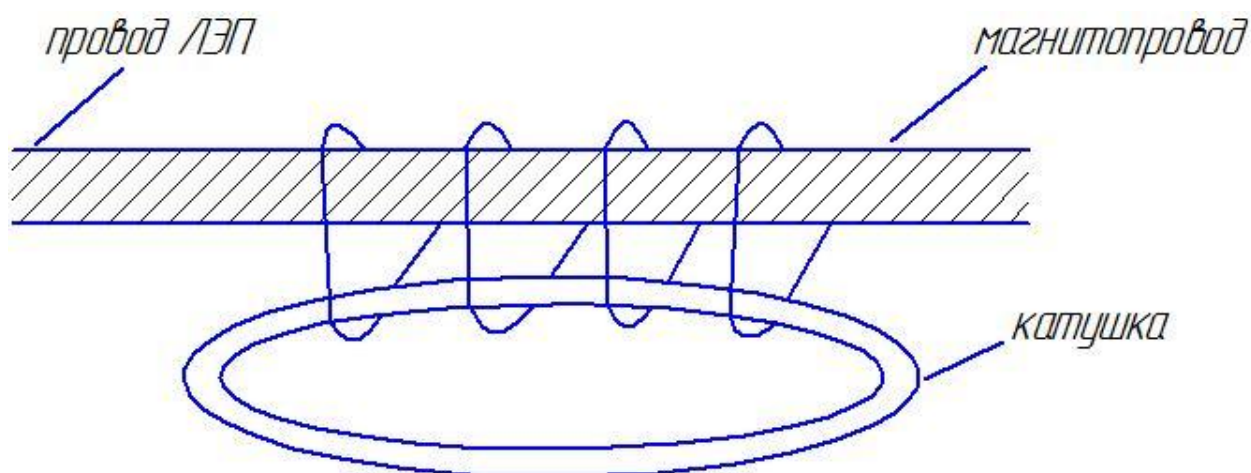


Рисунок 3.4 – Датчик тока повышенной чувствительности

Эту обмотку можно считать магнитопроводом, через который проходят две обмотки: первичная в виде частичного витка и вторичная с большим количеством витков. Поскольку вся эта конструкция с другими устройствами будет связана по оптическому каналу, электрический пробой в данном случае возникнуть не может.

3.3 Измерительные схемы для описанных трансформаторов

3.3.1 Базовая схема датчика

Для наиболее простого случая, когда энергии датчика достаточно лишь для питания светодиода оптоволоконной линии связи, необходимо учесть следующие факторы:

Из-за большого количества витков сопротивление обмотки может оказаться достаточно большим и оказать существенное влияние на измерения.

Зависимость наведенной в обмотке датчика ЭДС от тока в ближней зоне имеет труднопрогнозируемый характер, а зависимость светового потока светодиода от величины подаваемого на него напряжения нелинейна.

В моменты прерывания тока в ЛЭП в обмотке датчика возникнет импульс ЭДС самоиндукции, который может повредить светодиод.

Для оценки сопротивления обмотки рассмотрим предельный из рассмотренных выше вариант 15000 витков при сечении витка 10 см^2 . Полагая, что катушка имеет круглую форму, воспользуемся известными соотношениями для площади круга и длины окружности и получим длину витка $11,2 \text{ см}$. С учетом многослойности катушки примем ее длину окружности равной 12 см . Тогда для 15000 витков суммарная длина провода составит 1800 м .

Для медного провода диаметром $0,1 \text{ мм}$ сопротивление 1 метра равно $2,23 \text{ Ом}$, а всей катушки – около 4 кОм . Датчик из такого провода будет обеспечивать ток около 1 мА . Современные светодиоды обеспечивают достаточно яркое свечение при токе от $3 \dots 5 \text{ мА}$.

Ранее мы обосновали решение о приближении оптоволоконного датчика к проводу ЛЭП. Принимая во внимание малый диаметр оптоволокна, вполне возможна концентрации света с помощью линзы. Также может быть применена катушка из более толстого провода на ферромагнитном сердечнике. Таким образом проблему влияния сопротивления катушки на работу измерительной схемы можно считать вполне разрешимой.

Ожидаемая характеристика датчика в общем случае будет нелинейной. Вместе с тем, нет никаких причин допускать появление на ней максимумов и минимумов, поскольку все характеристики частных процессов в данном случае имеют монотонный характер. Так как задача датчика заключается в контроле факта превышения током ЛЭП заданного значения, целесообразно использование компараторной схемы.

Возникновение импульса ЭДС самоиндукции в обмотке при прерывании тока в ЛЭП неизбежно. Его величина, с одной стороны, определяется значительной силой тока, с другой ограничивается распределенными реактивностями линии, которые повлияют на временные характеристики переходных процессов. Расчет не гарантирует достоверности результатов. Более того, универсальность разрабатываемых датчиков предполагает возможность их применения в силовых цепях произвольной конфигурации, таким образом, будем исходить из предположения.

Эта проблема может быть решена как с помощью традиционных RC- цепочек, так и с помощью мощных супрессоров.

Полученный на приемном конце свет из оптического волокна имеет малую интенсивность и для его восприятия должен быть применен датчик с максимальной чувствительностью. Такому требованию удовлетворяет фоторезистор. Его недостаток – значительная инерционность в данном случае не имеет значения. Вариантов построения приемника оптического излучения существует множество. Один из возможных приведен на рисунке 3.5.

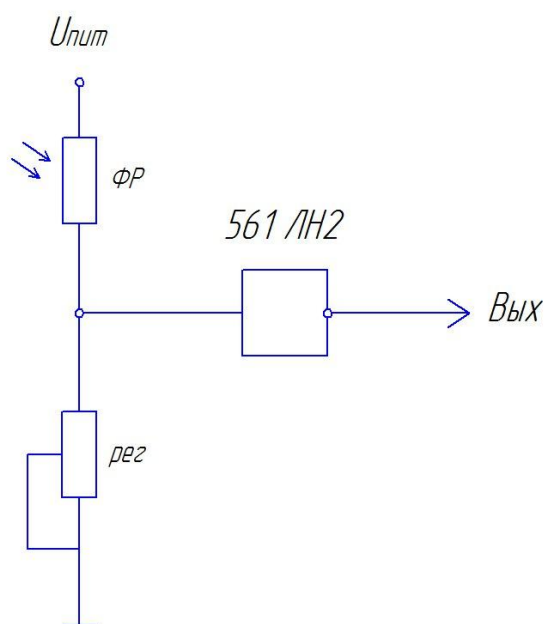


Рисунок 3.5 – Вариант схемы фотоприемника

В данной простейшей схеме роль порогового устройства выполняет инвертор из состава микросхемы 561ЛН2. На его вход подается напряжение с делителя, образованного фоторезистором (ФР) и регулятором. Регулировка заключается в установлении приближенного равенства сопротивления освещенного фоторезистора и сопротивления регулятора. Вход инвертора имеет высокое сопротивление – несколько мегаом и отдельные пороги включения и выключения. Этим обеспечивается отсутствие электрического дребезга в пограничном состоянии.

3.3.2. Схема датчика тока с импульсным выходом

Импульсная схема датчика предназначена для формирования выходного сигнала в форме импульсов, которые могут быть восприняты цифровым устройством. Идея такого технического решения заключается в применении транзисторной оптопары в составе генератора импульсов, питаемого от датчика.

Ввиду некоторой сложности устройства, разделим его на простые составные части. Первая из них должна обеспечить получение энергии от ЛЭП с помощью специального трансформатора и формирование двух напряжений стабильного 3 В для питания электроники и измерительного сигнала, пропорционального току. Вариант его реализации приведен на рисунке 3.6.

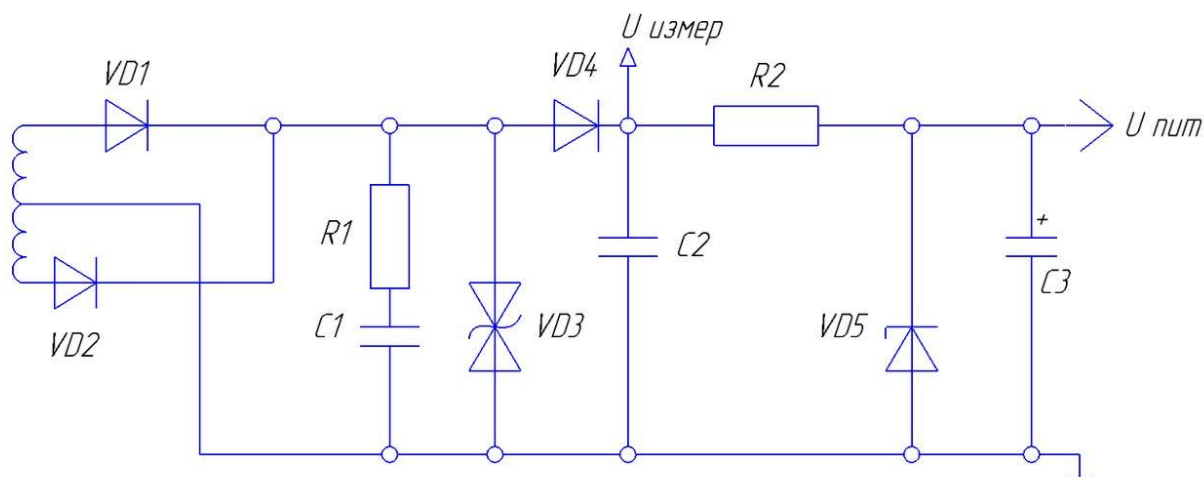


Рисунок 3.6 – Формирователь питающего и измерительного напряжений

Наведенная ЭДС на выходе вторичной обмотки – катушки датчика выпрямляется с помощью двух диодов. Такая конструкция со средней точкой требует большего числа витков в катушке, однако экономит напряжение, поскольку на стандартном диодном мосту падение напряжения вдвое больше. В принципе, возможно применение как двух диодов, так и диодного моста. Конкретный выбор зависит от тока линии и величины снимаемого с катушки напряжения. При этом нужно учесть, что из-за сложного характера электромагнитного поля в ближней зоне форма напряжения во вторичной обмотке значительно отличается от синусоидальной. Окончательное решение в данном случае нужно принимать по результатам наблюдения формы напряжения с помощью осциллографа. Выпрямленное напряжение имеет крайне неровную форму, поэтому оно сглаживается с помощью конденсатора. Этот сигнал используется как измерительный, пропорциональный току. Далее часть этого сигнала, отделяемая и стабилизируемая с помощью стабилитрона, используется в качестве источника питания микросхемы, ток которой не превышает 10 мА.

За основу источника информационных сигналов возьмем широко распространенную схему генератора импульсов на трех инверторах и заменим в нем частото задающий резистор на транзистор из состава оптопары. Тогда частота следования импульсов будет зависеть от тока в ЛЭП. Схема генератора показана на рисунке 3.7.

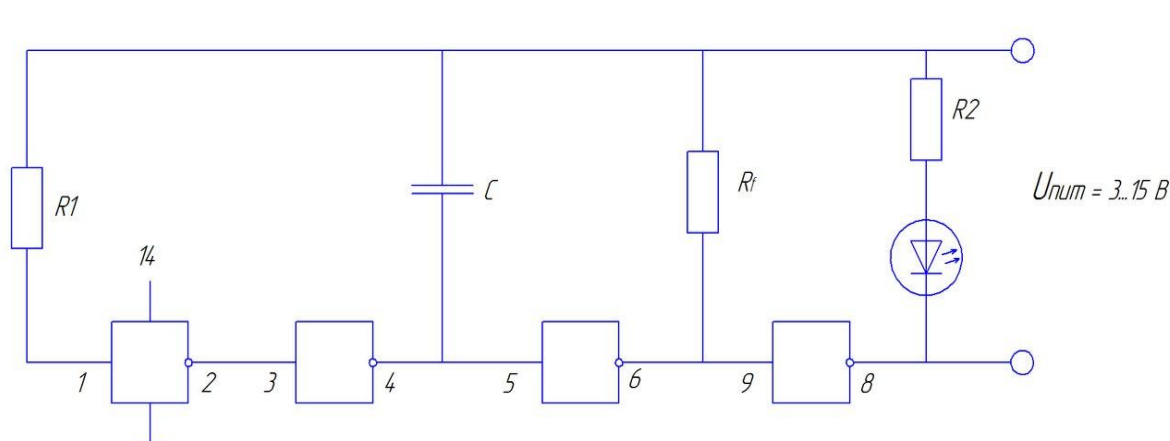


Рисунок 3.7 – Базовая схема генератора световых импульсов

В данной схеме частота следования импульсов определяется емкостью конденсатора и резистором R2 (резистор R1 является ограничительным и на частоту не влияет). Вместо него может быть использована пара включенных встречно-параллельно транзисторов из состава оптронов, Схема такой доработки иллюстрируется рисунком 3.8.

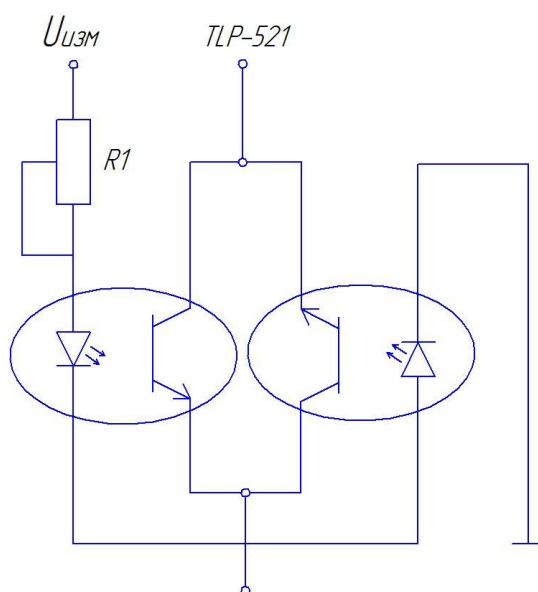


Рисунок 3.8 – Электронный аналог частото задающего резистора

Реализация такой схемы возможна при достаточной мощности датчика, поскольку он является еще и источником питания электронной схемы. Поскольку схемотехника выходит за рамки проводимых исследований, детализацию проводить не будем, заметив лишь, что электронные часы и некоторые другие устройства чрезвычайно экономичны.

3.4 Разработка датчика заземления шины

При выполнении работ на распределительном устройстве шины заземляются. Перед подачей питания на них заземление должно быть выключено. Однако, имели место случаи, когда из-за ошибок персонала это сделано не было, что приводило к аварийным отключениям. Следовательно, необходима специальная блокировка, запрещающая подачу питания на заземленную шину.

К каждой шине подключен измерительный трансформатор 220 кВ/100 В. Однако, при отсутствии питания на его выходе отсутствует сигнал и нельзя узнать, подключено заземление или нет. Решение этой проблемы будем искать, исходя из следующих рассуждений. Вторичная обмотка трансформатора представляет собой катушку индуктивности, имеющую магнитную связь с первичной обмоткой. Если первичная обмотка не нагружена, то эта связь существенного влияния не оказывает, а если она заземлена, то такое влияние многократно возрастает, поскольку приведет к потерям любого колебательного процесса.

Датчик заземления должен работать следующим образом. К вторичной обмотке трансформатора с помощью реле подключается заряженный конденсатор и в образовавшееся колебательном контуре возникнут экспоненциально затухающие колебания. Скорость их затухания определяется потерями в контуре. Следовательно, картина колебательного процесса при отключенном и подключенном заземлении будет различна.

Разработка датчика, работающего в соответствии с описанным принципом требует разработки схемы подключения заряженного конденсатора к вторичной обмотке трансформатора и схемы, анализирующей затухание колебательного процесса.

На рисунках 3.9 и 3.10 показаны колебания энергии в параллельном колебательном контуре при малых и больших потерях. Из сравнения рисунков видно, что датчик можно построить по принципу счетчика колебаний, амплитуда которых превышает некоторый установленный порог.

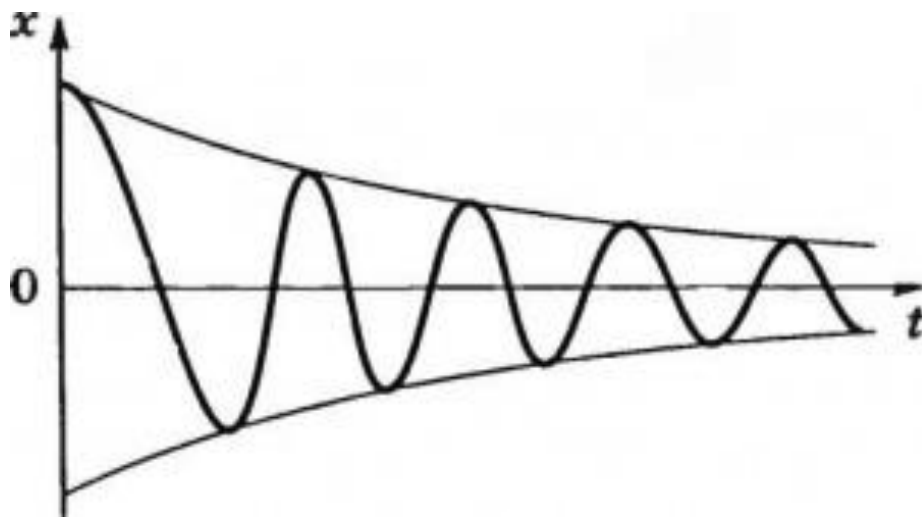


Рисунок 3.9 - Колебательный процесс при отключенном заземлении



Рисунок 3.10 - Колебательный процесс при подключенном заземлении

Вторичная обмотка трансформатора и конденсатор образуют параллельный колебательный контур, потери которого зависят от результирующего сопротивления R , зависящего, в общем случае, от потерь на нагрев проводников и из-за короткозамкнутой первичной обмотки. Эквивалентная схема представлена на рисунке 3.11.

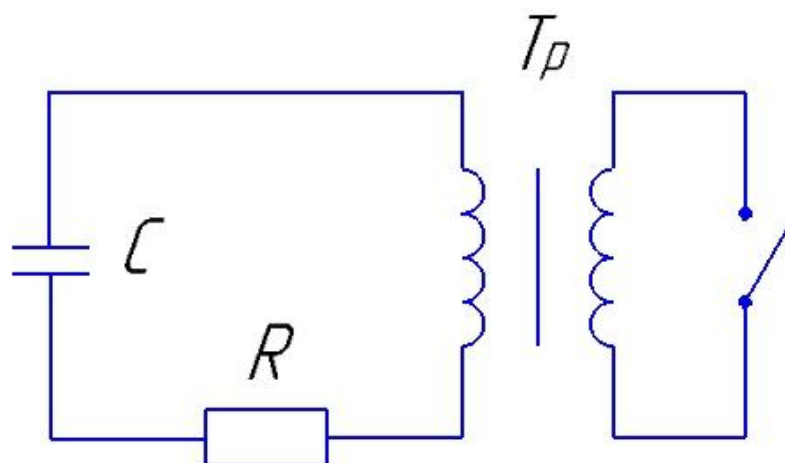


Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема

Построение датчика заземления предполагает решение двух частных задач: создание системы, подключающей заряженный конденсатор к вторичной обмотке трансформатора и счетчика импульсов колебательного процесса.

Первая задача достаточно проста. Вариант ее решения поясняется рисунком 3.12.

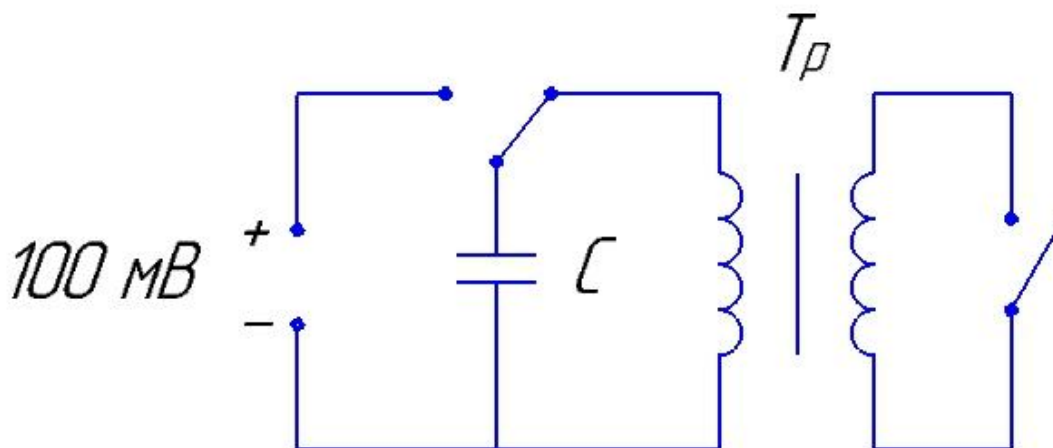


Рисунок 3.12 – Принцип создания колебаний в контуре

Выходное напряжение измерительного трансформатора 100 В. Для измерений достаточно 100 мВ. В этом случае напряжение первичной обмотки также будет в 1000 раз меньше номинального напряжения ЛЭП, то есть работа датчика является совершенно безопасной.

Решающее устройство, оценивающее скорость затухания колебательного процесса, несколько сложнее, но особых проблем не представляет. Принцип его работы может быть следующим. Напряжение колебаний контура подается на один из входов компаратора, второй вход которого отрегулирован так, чтобы несколько первых колебаний в своем максимуме превышали этот уровень. Тогда на выходе будут формироваться прямоугольные импульсы. При быстрозатухающих колебаниях таких импульсов будет значительно меньше или не будет вовсе. Схемотехника детектора состояний заземления в соответствии с описанным подходом не представляет трудностей, однако выходит за рамки профиля обучения и подробно рассматриваться не будет.

Для проведения эксперимента может быть применена схема импульсной накачки контура и наблюдение за колебательным процессом с помощью осциллографа. Ее вариант представлен на рисунке 3.13.

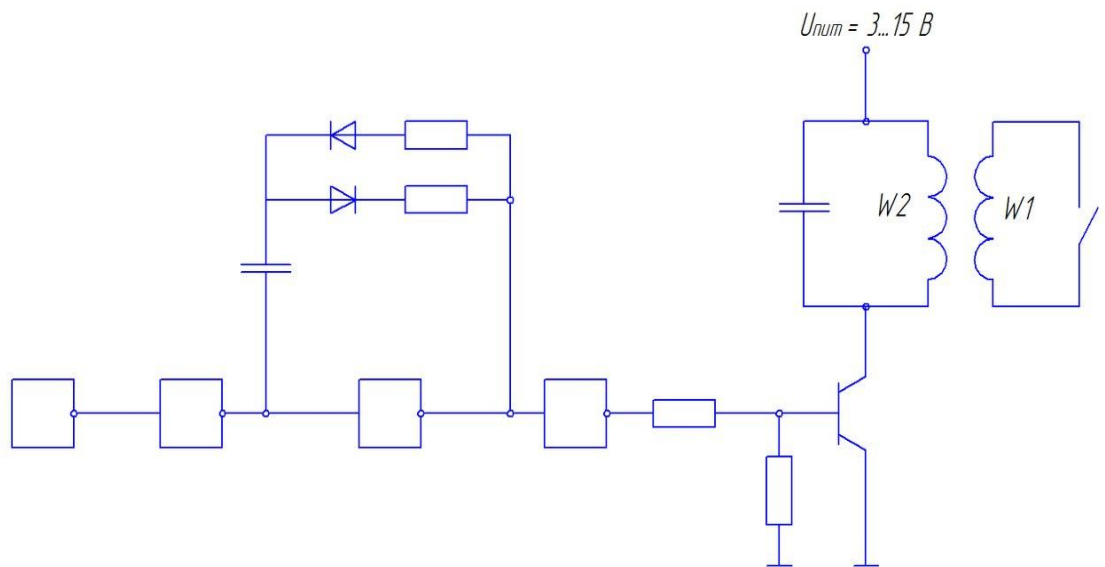


Рисунок 3.13 – Экспериментальная схема датчика заземления

В основу измерительной схемы положен ранее рассмотренный генератор прямоугольных импульсов на трех инверторах микросхемы 561 ЛН2. Отличие заключается в разделении частото задающей цепи на две части, формирующие длительность и скважность импульсов

4. Экспериментальные исследования датчиков

4.1. Организационно-технический аспект эксперимента

Поскольку исследование предложенных конструкций датчиков непосредственно на ЛЭП напряжением 220 кВ невозможно, требуется изготовить модель такой линии. Так как магнитная индукция связана с током, а не напряжением, имеет смысл изготовить лабораторный фрагмент цепи переменного тока силой до 1000 А.

В основу построения такой модели положим принцип работы контактной сварки – использование короткозамкнутого витка силового трансформатора. Для этого необходимо изготовить трансформатор достаточной габаритной мощности, первичная обмотка которого рассчитана по известной методике, а вторичная представляет собой один короткозамкнутый виток толстого провода, по которому и будет протекать значительный ток. Его регулирование целесообразно осуществлять через первичную обмотку с помощью резистивной нагрузки.

Учитывая ограниченные материальные возможности, изготавливать трансформатор пришлось из подручных средств. В нашем распоряжении оказался тороидальный магнитопровод от ЛАТРа, показанный на рисунке 4.1.

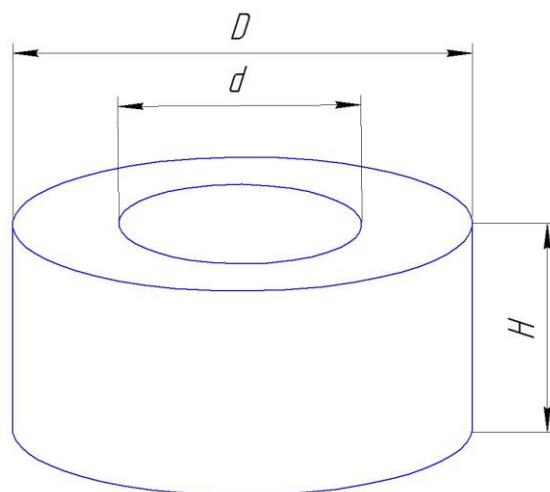


Рисунок 4.1 – Магнитопровод

Поскольку силовые возможности изделия такого рода определяются его габаритной мощностью, оценим ее, исходя из результатов измерений. Наш магнитопровод имеет размеры:

$$D = 135 \text{ мм},$$

$$d = 60 \text{ мм},$$

$$H = 75 \text{ мм}.$$

Для определения максимального тока в короткозамкнутом витке рассчитаем габаритную мощность трансформатора. Она зависит от формы и размеров магнитопровода и для нашего случая с приемлемой для практики точностью может быть выражена формулой

$$P = 1.9 * S_c * S_o, \quad (4.1)$$

где S_c – сечение стали, а S_o – площадь окна.

Подставив указанные на рисунке значения, получим

$$P = 1,9 \times 30 \times 28,3 = 1610 \text{ Вт} \quad (4.2)$$

Для расчета количества витков в первичной обмотке воспользуемся упрощенной формулой:

$$W_1 = 40 * U / S_c = 40 \times 220/30 = 293 \text{ витка} \quad (4.3)$$

На 1 виток приходится $220/293 = 0,75 \text{ В}$

Тогда для 1 КЗ витка без учета потерь ток будет $1610/0,75 = 2146 \text{ А}$, чего вполне достаточно для наших экспериментов.

Известные расчетные формулы для определения сечения проводов первичной обмотки и короткозамкнутого витка предполагают длительный режим работы. В нашем случае измерения будут проводиться кратковременно. Тем не менее, воспользуемся ими для полноты расчетов по выражениям 4.4, 4.5.

Для круглого медного провода

$$d[\text{мм}] = 0,632 \sqrt{I[\text{А}]} = 20 \text{ мм} \quad (4.4)$$

Для алюминия

$$d[\text{мм}] = 0,8 \sqrt{I[\text{А}]} = 25,3 \text{ мм} . \quad (4.5)$$

Это соответствует сечению 314 мм^2 и 502 мм^2 .

Полученные величины делают практическую реализацию такого устройства проблематичной. Поэтому будем исходить из кратковременного режима измерений. В этом случае естественным ограничением является собственное сопротивление провода короткозамкнутого витка. Учитывая геометрические размеры магнитопровода, длина витка составит $0,35 \dots 0,4 \text{ м}$. Предположительно, из экономических соображений, будем использовать алюминиевый провод.

По закону Ома, учитывая напряжение 1 витка $0,75 \text{ В}$ максимальное сопротивление отрезка $0,4 \text{ м}$ должно быть не более $0,75 \text{ мОм}$. Для куска провода длиной 1 м оно составит $1,875 \text{ мОм}$. Отсюда определим, что минимальное сечение алюминиевого короткозамкнутого витка равно 15 мм^2 . Однако при этом провод будет сильно нагреваться. Поэтому эту величину нужно взять в несколько раз больше. Подходящим вариантом является алюминиевая полоса шириной 15 мм и толщиной 3 мм , которую можно найти в строительных магазинах.

Изготовленный в соответствии с вышеприведенными рассуждениями трансформатор, моделирующий фрагмент ЛЭП, показан на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2. – Установка для эксперимента с датчиком тока

4.2 Результаты экспериментальных исследований

4.2.1 Измерение тока в имитаторе фрагмента ЛЭП

Исследования разработанных датчиков тока проводились на модели фрагмента ЛЭП. Перед экспериментальными исследованиями была оценена адекватность данной модели и реальных токов линии. В разрыв первичной обмотки трансформатора, изображенного на рисунке 4.2. включалась нагрузка с целью ограничения тока вторичной обмотки, имитирующей фрагмент ЛЭП с током до 1000 А. Экспериментально было установлено, что ток вторичной обмотки 750 А получается при использовании нагрузки мощностью 2,2 кВт в виде бытового электрического чайника. Полученное значение тока, по нашему мнению, вполне отражает реальный ток ЛЭП [9].

4.2.2 Испытание измерительных трансформаторов

Эксперимент №1 – Испытание трансформатора без сердечника.

При всех вариантах испытаний (изменение тока и места расположения датчика на вторичной обмотке) результаты неудовлетворительные – уверенного включения светодиода не получено.

Эксперимент №2 – Испытание трансформатора с сердечником (рисунок 3.3)

Получено свечение светодиода при максимальном токе. Передача излучения с помощью оптоволокна возможно при использовании фокусирующей линзы. При меньших токах наведенная ЭДС оказывается меньше порогового напряжения светодиода.

Вывод – такой трансформатор применим для индикации тока в линии, нагруженной более, чем на 500А. Для остальных задач, решаемых в настоящей работе, требуется более эффективный трансформатор.

Эксперимент №3 – Испытание трансформатора с замкнутым магнитопроводом (рисунок 3.4)

Результаты эксперимента значительно превосходят полученные ранее. Яркое свечение светодиода получено при токах от 50 А и выше. При максимальном токе 750 А напряжение на выходе датчика (сглаженное амплитудное зна-

чение) достигает 30 В. При этом светодиод горит ярко даже при последовательном подключении резистора 10 кОм.

Вывод – данная конструкция датчика тока является оптимальной.

4.2.3 Испытания датчика заземления шины

Испытания разработанного датчика заземления шины показало четкое разграничение характера колебаний при имитации замыкания первичной обмотки в отсутствие такового. Практически при замкнутой первичной обмотке отсутствует даже второй максимум. При разомкнутой вторичной обмотке число наблюдаемых максимумов более 5.

Вывод – фиксация факта подключения заземления к шине описанным способом возможна.

Заключение

В выпускной квалификационной работе выполнена разработка блокировки, запрещающая подачу питания на заземляющую шину и разработка датчика заземления шины. Выполнено описание экспериментальных исследований датчиков, в результате чего было принято решение, что конструкция датчика тока с замкнутым магнитопроводом является самой оптимальной, так как результаты этого эксперимента превосходят результаты предыдущих.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы было выполнены все запланированные задачи и достигнута цель бакалаврского проекта.

Список использованных источников

1. Общие сведения о конструкции трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/transformatori/o-svedeniya-o-konstrukcii-transformatorov.html> свободный.
2. Старшинов, В.А. Электрическая часть электростанций и подстанций. Учебное пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
3. Шеховцов, В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению: справочное пособие / В. П. Шевцов - М.: Инфра-М, 2014. - 136 с.
4. Гальперин, М.В. Электротехника и электроника: Учебник / М.В. Гальперин. - М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 480 с
5. Кузовкин, В.А. Электротехника и электроника. учебник для бакалавров / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 431 с
6. Борисов Р.К., Жуликов С.С., Уситвина А.А. Результаты комплексной проверки работоспособности оперативных блокировок безопасности на электрических подстанциях. Вестник МЭИ. – 2013. -№2.
7. Борисов Р.К., Жуликов С.С., Уситвина А.А. Анализ состояния систем оперативных блокировок безопасности на энергообъектах. Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. - №1. – С.5-9.
8. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://info.wikireading.ru/50025> свободный.
9. Датчики тока, напряжения и мощности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/> свободный.
10. Оперативная блокировка разъединителей [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dororz.ru/cons_13_8_3.htm свободный.
11. Датчики тока. Требования, типы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://studopedia.org/8-178944.html> свободный.

12. Электротехническая энциклопедия #16. Датчики [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm свободный.
13. Системы управления сетью и оборудованием. ФСК ЕЭС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/innovation/> свободный.
14. IEEE Std 1415™ – 2012. "IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis".
15. Режимы работы трансформаторов. Эксплуатация силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://leg.co.ua/instrukcii/eksploataciya-silovyh-transformatorov-2.html> свободный.
16. Ultraviolet Radiation Emissions and Illuminance in Different Brands of Compact Fluorescent Lamps, <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2015/504674/>
17. Experimental investigation of methyl ester of cotton seed oil blend with diesel on ci engine, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001945>
18. Experimental investigations on mixing of two biodiesels blended with diesel as alternative fuel for diesel engines, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S101836391400035X>
19. The effects on radial distribution networks caused by replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps and LEDs, <http://revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/view/25219/33720>
20. The Losses at Power Grid Caused by Small Nonlinear Loads, http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_10-1/19-Stevanovic-Petkovic.pdf