Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Конспект лекций для студентов специальностей
5В071800 – Электроэнергетика,
5В081200- Энергообеспечение сельского хозяйства

Алматы 2016

СОСТАВИТЕЛИ: М.В. Башкиров, Мерекенов М.Д. Элементная база релейной защиты. Конспект лекций для студентов специальностей 5В071800 – Электроэнергетика, 5В081200 - Энергообеспечение сельского хозяйства. – Алматы: АУЭС, 2016. - 77с.

В конспекте лекций по дисциплине «Элементная база релейной защиты» приведены основные виды защит линий 10-110кВ, трансформаторов и автотрансформаторов.

Ил.37, библиогр. - 11 назв.

Рецензент: ст. пр. каф. ЭССиС Курпенов Б.К.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2016 год.

zНАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2016г.

Содержание

1	Лекция №1. Назначение релейной защиты……..	5
2	Лекция №2. Классификация реле защиты и основные требования, предъявляемые к релейной защите…….	9
3	Лекция №3. Электромагнитные реле тока и напряжения. Назначение основных логических элементов схем релейной защиты……..……..	12
4	Лекция №4. Индукционных реле тока ……	18
5	Лекция №5. Источники и схемы оперативного тока……..	26
6	Лекция №6. Устройства РЗА на микроэлектронной элементной базе. Основные узлы реле защиты, выполненных на операционных усилителях……...	29
7	Лекция №7. Реле защиты, выполненных на операционных усилителях, и интегральных микросхемах……...	34
8	Лекция №8. Трансформаторы тока ……..	40
9	Лекция №9. Трансформаторы напряжения……..	46
10	Лекция №10. Принцип действия токовых защит. Максимальная токовая защита ЛЭП. Токовые отсечки. Схемы токовых отсечек……	50
11	Лекция №11. Продольная дифференциальная защита линий……...	54
12	Лекция №12. Защиты трансформаторов и автотрансформаторов	57
13	Лекция №13. Газовая защита трансформаторов……..	64
14	Лекция №14. Основные сведения о микропроцессорных устройствах релейной защиты, автоматики…….	67
15	Лекция №15. Установки для проверки устройств РЗА……..	73
	Список литературы……	76

1 Лекция № 1. Назначение релейной защиты

Содержание лекции: основные сведения о сетях переменного тока. Виды повреждений и ненормальных режимов работы в энергосистемах.

Цель лекции: знакомство с этапами развития техники релейной защиты и её задач, анализ причин системных аварий.

1.1 История развития РЗА

В 1888 г. выдающийся русский электротехник М.О. Доливо-Добровольский, которому принадлежит много работ и изобретений в разных областях электротехники, изобрел систему трехфазного тока. Вскоре под его руководством впервые в мире была осуществлена передача электрической энергии токами достаточно высокого напряжения (15 кВ) на большое расстояние. На гидроэлектростанции около города Лауфена (Германия) был смонтирован трехфазный генератор мощностью 300 лошадиных сил, повышающий трансформатор, линия электропередачи напряжением 15 кВ/ междуфазных, понизительный трансформатор и приемник - в виде трехфазного двигателя. Налицо были все основные элементы современных систем электроснабжения. В их числе были смонтированы и устройства защиты трехфазной линии электропередачи.

История первого срабатывания первого защитного устройства трехфазной системы такова. Еще при проектировании линии электропередачи общественность высказала опасение относительно безопасности линии при каких-либо ее повреждениях. Поэтому вместо предложенного М.О. Доливо-Добровольским напряжения 28 - 30 кВ было дано добро только на напряжение 15 кВ. Несмотря на это, после окончания строительства власти городов, вблизи которых проходила эта линия, запретили ее включение, потребовав дополнительных доказательств ее безопасности. И тогда автор пошел на рискованный эксперимент. После подачи напряжения, в месте пересечения этой линии с железной дорогой был искусственно оборван провод. Сразу после касания рельса проводом М.О, Доливо-Добровольский подошел к нему и на глазах многочисленных официальных представителей коснулся его голой рукой. Можно с нынешних позиций техники безопасности осуждать действия Доливо-Добровольского, но нельзя не восхищаться его смелостью и уверенностью в том, что защита, сконструированная им, отключит поврежденную линию! Трудно представить более наглядную демонстрацию необходимости защитных устройств и эффективности их действия.

По мере развития трехфазных систем электроснабжения в XX веке стала развиваться и техника релейной защиты, на первом этапе основанная на принципе реагирования на увеличение тока, протекающего через защищаемый элемент. Почти сразу встал вопрос о том, как отличить токи, определяемые нагрузкой, от токов, которые определяются повреждением

элементов электроснабжения. Другими словами, возникла необходимость рассчитать ток короткого замыкания. Работая над системой трехфазного переменного тока. М. О. Доливо-Добровольский начал использовать векторные диаграммы для изображения трехфазных токов и напряжений. К 1909 году была разработана теория протекания тока в земле, что оказалось важным для анализа несимметричных коротких замыканий. В 1930 году, американский ученый Фортескью предложил несимметричную и нескомпенсированную систему векторов представлять в виде геометрической суммы двух симметричных и скомпенсированных векторов и одной нескомпенсированной системы одинаково направленных векторов. Применительно к трехфазным несимметричным электрическим цепям эти идеи развили Вагнер и Эванс, а применительно к расчету токов короткого замыкания - Вагнер и Щедрин. Этот метод впоследствии был назван методом симметричных составляющих (название не совсем точное, поскольку третья система векторов не является симметричной). Первые две системы векторов были названы составляющими прямой и обратной последовательности, а третья - составляющей нулевой последовательности. Техника релейной защита совершенствовалась с развитием энергосистемы и ростом уровня напряжений линий электропередач.

В заключение исторического обзора о развитии релейной защиты и автоматики приведем выдержку из современного учебника по релейной защите господина Элмора (США 1994 г.), в котором автор столь проникновенно пишет о релейной защите, что трудно оставить этот текст без внимания: «Релейная защита - постоянно изменяющаяся и расширяющаяся наука, что восхищает даже тех, кто глубоко и всеобъемлюще вовлечен в эту науку, и в первую очередь, автора этой книги». Не случайно релейщиков называют «белой костью и голубой кровью энергетики», т. е. причисляют к аристократическому сословию. Это потому, что в релейных службах задерживаются только хорошо теоретически подготовленные инженеры, способные творчески относиться к сложнейшим задачам, от правильного решения которых зависит успешная деятельность энергетических систем.

1.2 Назначение релейной защиты и автоматики

При эксплуатации энергетического оборудования и электрических сетей неизбежны их повреждения и ненормальные режимы. Наиболее опасными являются короткие замыкания, повреждения изоляции и перегрузки.

Короткие замыкания возникают из-за пробоя или перекрытия изоляции, обрывов проводов, ошибочных действий персонала (включения под напряжение заземленного оборудования, отключения разъединителей под нагрузкой) и других причин.

В большинстве случаев в месте КЗ возникает электрическая дуга, термическое действие которой приводит к разрушениям токоведущих частей, изоляторов и электрических аппаратов. При КЗ к месту повреждения подходят большие токи (токи КЗ), измеряемые тысячами ампер, которые

перегревают неповрежденные токоведущие части и могут вызвать дополнительные повреждения, т. е. развитие аварии. Одновременно в сети, электрически связанной с местом повреждения, происходит глубокое понижение напряжения, что может привести к остановке электродвигателей и нарушению параллельной работы генераторов.

В большинстве случаев развитие аварий может быть предотвращено быстрым отключением поврежденного участка электрической установки или сети при помощи специальных автоматических устройств, действующих на отключение выключателей, и получивших название релейная защита.

При отключении выключателей поврежденного элемента гаснет электрическая дуга в месте КЗ, прекращается прохождение тока КЗ и восстанавливается нормальное напряжение на неповрежденной части электрической установки или сети. Благодаря этому, минимизируются или даже совсем предотвращаются повреждения оборудования, на котором возникло КЗ, а также восстанавливается нормальная работа неповрежденного оборудования.

Таким образом, основным назначением релейной защиты является выявление места возникновения КЗ и быстрое автоматическое отключение выключателей поврежденного оборудования или участка сети от остальной неповрежденной части электрической установки или сети.

Кроме повреждений электрического оборудования могут возникать такие нарушения нормальных режимов работы, как перегрузка, замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью, выделение газа в результате разложения масла в трансформаторе, или понижение уровня масла в его расширителе и др.

В указанных случаях нет необходимости немедленного отключения оборудования, так как эти явления не представляют непосредственной опасности для оборудования и могут самоустраниться. Поэтому при нарушении нормального режима работы на подстанциях с постоянным обслуживающим персоналом, как правило, достаточно дать предупредительный сигнал персоналу подстанции.

Таким образом, вторым назначением релейной защиты является выявление нарушений нормальных режимов работы оборудования, которые могут привести к аварии, и подача предупредительных сигналов обслуживающему персоналу, или отключение оборудования с выдержкой времени. Устройства РЗА должны быть постоянно включены. Устройства аварийной и предупредительной сигнализации должны быть всегда готовы к действию.

Свое название релейная защита получила от названия основного элемента схем защиты – реле. В настоящее время мы переживаем настоящую техническую революцию, связанную с приходом нового поколения устройств РЗА – микроэлектронной и микропроцессорной техники.

1.3 Замыкания в сетях. Некоторые сведения о сетях переменного тока

В большинстве электрических сетей применяется переменный ток, в связи с его существенными преимуществами перед постоянным током.

Сети могут быть однофазные и трехфазные. Однофазные сети состоят из прямого и обратного провода, т.е. для передачи требуется обязательно 2 провода. Трехфазная сеть состоит из трех проводов и, таким образом, обратный провод отсутствует. Так как в трехфазной симметричной сети сумма токов трех фаз равна нулю, исчезает необходимость в обратном проводе. Если же трехфазная сеть используется для питания однофазных электроприемников, то нагрузка по фазам может быть неодинакова, и появляется необходимость в обратном проводе, в котором протекает разность токов трех фаз. В трехфазном четырехпроводном исполнении выполнены сети 0.4 кВ бытового назначения.

Напряжения стандартизованы и величина их в странах СНГ соответствует следующей шкале:
220 В, 0.4; 1; 2; 3; 6; 10; 15; 20, 25; 35; 110; 154; 220; 330; 400; 500; 750; 1150 кВ.

При этом подразумевается величина напряжения между фазами – линейное напряжение. Реальная величина напряжения электрических аппаратов может отличиться от этой шкалы на 5% и более – эта шкала поэтому именуется класс напряжения.

Трехфазные сети имеют четвертую точку, которая может существовать физически или условно. Эта точка называется нейтралью. Напряжение в этой точке равно геометрической сумме напряжений трех фаз, а напряжение фазы равно напряжению между фазным проводом и этой нейтральной точкой. Трехфазные аппараты могут иметь обмотки, которые соединяются между собой в звезду – концы всех обмоток соединяются в одну точку – это нейтраль – физически существующая нулевая точка. Если обмотки соединяются в треугольник- каждая обмотка подключается к 2 фазам – такая точка физически отсутствует, однако она существует – это земля, относительно которой и измеряются фазные напряжения. Напряжение между 2 фазами называется линейным (междуфазным напряжением), напряжение между фазой и землей – фазным.

По режиму нейтрали, сети разделяются на сети с изолированной и заземленной нейтралью.

К сетям с изолированной нейтралью относятся сети напряжением 220 В и 1-35 кВ. В этих сетях нулевая точка изолирована от земли, или соединена с землей через большое сопротивление дугогасящего реактора, или через активное сопротивление 500 –100 Ом.

К сетям с заземленной нейтралью относятся сети 0,4 кВ и сети 110 -1150 кВ. В сетях с заземленной нейтралью, нейтраль обмотки трансформатора,

соединенной в звезду, присоединяется к заземляющему контуру непосредственно, или через малое сопротивление. Сети напряжением 110 кВ называются также сетями с эффективно заземленной нейтралью. В таких сетях нейтраль части трансформаторов остается разземленной. Это снижет величину тока короткого замыкания и улучшает работу релейной защиты. Однако при этом требуется следить, чтобы ни в одном из возможных режимов не выделялся участок сети, где нейтрали всех трансформаторов изолированы. Сетей 220-1150 кВ относятся к сетям с глухозаземленной нейтралью.

1.4 Повреждения и ненормальные режимы работы в энергосистемах. Основные сведения о коротких замыканиях

Короткие замыкания, возникающие в электрических сетях, машинах и аппаратах, отличаются большим разнообразием как по виду, так и по характеру повреждения.

Междуфазные КЗ — двухфазные и трехфазные — возникают в сетях как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Однофазные КЗ могут происходить только в сетях с заземленной нейтралью.

Основными причинами, вызывающими повреждения на линиях электропередачи, являются перекрытия изоляции во время грозы, схлестывания и обрывы проводов при гололеде, набросы, перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции, ошибки персонала и др.

Ненормальные режимы. Перегрузка оборудования, вызванная сверхтоком, т. е. увеличением тока сверх номинального значения.

Номинальным называется максимальное значение тока, допускаемое для данного оборудования в течение неограниченного времени. Если ток I, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемой им дополнительной теплоты температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимое значение, что приводит к ускоренному старению изоляции и токоведущих частей. Причиной сверхтока может быть увеличение нагрузки или появление КЗ за пределами защищаемого элемента (внешнее КЗ). Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к его разгрузке или отключению.

Повышение напряжения сверх допустимого значения может возникнуть на гидрогенераторах, а также на турбогенераторах большой мощности, работающих по схеме блока, при внезапном отключении их от сети. Для предотвращения повреждения оборудования предусматривается РЗ, действующая на гашение поля генератора.

2 Лекция №2. Классификация реле защиты и основные требования, предъявляемые к релейной защите

Содержание лекции: изучение классификации реле защиты и основных требований, предъявляемых к релейной защите. Основные органы защиты.

Цель лекции: получить представление об основных видах защит и требованиях, предъявляемых к релейной защите.

2.1 Классификация реле защиты

По способу подключения реле бывают:

- первичные (прямое включение в цепь защищаемого элемента);
- вторичные (включение через измерительные трансформаторы тока, напряжения).

По исполнению реле бывают:

- электромеханические, с подвижными элементами и контактными системами;
- статические, без подвижных элементов и контактов (электронные, микропроцессорные).

По назначению реле подразделяются на:

- измерительные реле (тока, напряжения, сопротивления, мощности, частоты, температуры, уровня) могут быть максимального или минимального действия.
- логические реле (промежуточные, двухпозиционные, времени, указательные (сигнальные).

Для измерительных реле характерно наличие опорных (образцовых) элементов в виде калиброванных пружин, источников стабильного напряжения, тока и т.п. Они входят в состав реле и воспроизводят заранее установленные значения, называемые - уставкой, какой-либо физической величины, с которой сравнивается контролируемая величина. Термин «уставка» предложен инженером Л.С. Бобровским (Свирьстрой, Ленинград) в 1929 г. взамен имеющего несколько значений термина «установка». Максимальные реле срабатывают при повышении контролируемого параметра, а минимальные – при понижении.

Логические реле (промежуточные реле) служат для размножения импульсов, полученных от других реле, усиления этих импульсов и передачи команд другим аппаратам, создания выдержек времени между отдельными операциями (реле времени), и для регистрации действия как самих реле, так и других вторичных аппаратов (указательные реле).

По способу воздействия на выключатель:

- реле прямого действия, подвижная система которых механически связана с отключающим устройством коммутационного аппарата (РТМ, РТВ);
- реле косвенного действия, которые управляют цепью электромагнита отключения.

2.2 Основные виды релейной защиты

1) Максимальная токовая защита (МТЗ) для радиальных линий 10-35 кВ с одним источником питания.

2) Направленная максимальная токовая защита для линий 10-35 кВ с двумя источниками питания.

3) Газовая защита (ГЗ) трансформаторов, автотрансформаторов.

4) Дифференциальная защита трансформаторов (ДЗТ), линий электропередачи (ДЗЛ).

5) Дистанционная защита (ДЗ) линий 110-500 кВ в сетях с несколькими источниками питания.

6) Дифференциальная защита шин (ДЗШ).

7) Дифференциально-фазная (высокочастотная) защита (ДФЗ) для линий 220-1150 кВ.

Подробно принцип действия и устройство отдельных защит изучаются на старших курсах в блоках дисциплин специализации.

2.3 Основные требования, предъявляемые к релейной защите

К релейной защите предъявляются такие основные требования:

1) Быстродействие.

2) Селективность.

3) Чувствительность.

4) Надежность.

Быстродействие. Быстродействие– это свойство релейной защиты отключать повреждение с минимально возможной выдержкой времени. Для сохранения устойчивости энергосистем требуется весьма малое время отключения КЗ. На ЛЭП 750-1150 кВ междуфазные КЗ необходимо отключать через 0,06-0,08 с после их возникновения, на ЛЭП 330-500 кВ - за 0,1-0,12 с, на ЛЭП 110-220 кВ-за 0,15-0,3 с.

Селективность или избирательность. Селективностью называется способность релейной защиты выявлять место повреждения и отключать его только ближайшими к нему выключателями (рисунок 2.1).

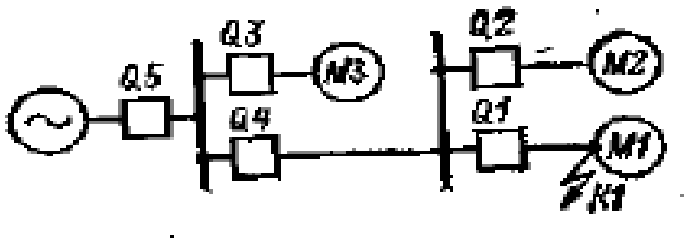


Рисунок 2.1 - Схема электроустановки к пояснению принципа селективности релейной защиты

Так, при КЗ в точке К1 (рисунок 2.1) для правильной ликвидации аварии должна подействовать защита только на выключателе Q1 и отключить этот выключатель. При этом остальная неповрежденная часть электрической установки останется в работе. Такое избирательное действие защиты называется селективным. Если же при КЗ в точке К1 раньше защиты выключателя Q1 или одновременно с ней действует защита выключателя Q4 и отключит этот выключатель, то ликвидация аварии будет неправильной, так как, кроме поврежденного электродвигателя М1, останется без напряжения неповрежденный электродвигатель М2. Такое действие защиты называется неселективным.

Из рисунка 2.1 видно, что если при КЗ в точке К1 подействует неправильно защита выключателя Q5 и отключит этот выключатель, то последствия такого неселективного действия будут еще более тяжелыми, так как без напряжения останутся оба неповрежденных электродвигателя М2 и М3.

Рассмотренный пример показывает, какое важное значение имеет выполнение требования селективности для обеспечения правильной ликвидации аварий.

Чувствительность. Чувствительность – это свойство защиты надежно срабатывать при КЗ в конце защищаемого участка в минимальном режиме работы системы.

Защита должна обладать такой чувствительностью к тем видам повреждений и нарушений нормального режима работы в данной электрической установке или электрической сети, на которые она рассчитана, чтобы было обеспечено ее действие в начале возникновения повреждения, чем сокращаются размеры повреждения оборудования в месте КЗ.

Надежность. Надежность – это свойство защиты гарантированно выполнять свои функции на протяжении всего периода эксплуатации. Защита должна правильно и безотказно действовать на отключение выключателей оборудования при всех его повреждениях и нарушениях нормального режима работы, для действия при которых она предназначена, и не действовать в нормальных условиях, а также при таких повреждениях и нарушениях нормального режима работы, при которых действие данной защиты не предусмотрено, и должна действовать другая защита. Требование надежности обеспечивается совершенством принципов защиты и конструкций аппаратуры, добротностью деталей, простотой выполнения, а также уровнем эксплуатации.

2.4 Основные органы защиты

Устройства релейной защиты состоят, как правило, из таких основных частей:

- пусковых органов;
- измерительных органов;

- логической части;
- исполнительной части;
- передающей части.

Пусковые органы непосредственно и непрерывно контролируют состояние и режим работы защищаемого оборудования и реагируют на возникновение КЗ и нарушения нормального режима работы. Пусковые органы выполняются с помощью реле тока, напряжения, мощности и др.

На измерительные органы возлагается задача определения места и характера повреждения и принятие решения о необходимости действия защиты. Измерительные органы также выполняются с помощью реле тока, напряжения, мощности и др. Функции пускового и измерительного органа могут быть объединены в одном органе.

Логическая часть представляет собой схему, которая запускается пусковыми органами и, сопоставляя последовательность и продолжительность действия измерительных органов, производит отключение выключателей мгновенно или с выдержкой времени, запускает другие устройства, подает сигналы и производит прочие предусмотренные действия. Логическая часть состоит в основном из элементов времени (таймеров), логических элементов, промежуточных и указательных реле. В аналоговых и микропроцессорных устройствах к ним добавляются дискретные входы и индикаторные светодиоды.

Исполнительная часть выполняет действие на отключение (включение) выключателей, или других внешних устройств.

Передающая часть используется в некоторых видах защит. Например, приемопередающая аппаратура ВЧ канала у дифференциально-фазных защит.

3 Лекция №3. Электромагнитные реле тока и напряжения. Назначение основных логических элементов схем релейной защиты

Цель лекции: получить представление о конструкции и назначении реле тока, напряжения, реле логики: промежуточных реле, реле времени, указательных реле.

Содержание лекции: приведены основные теоретические сведения о принципах действия электромагнитных реле и их конструктивном исполнении.

Реле тока и напряжения серий РТ и РН предназначены для работы в устройствах релейной защиты и автоматики в качестве органа, реагирующего на изменение тока и напряжения в контролируемой цепи. Контакты реле воздействуют на электрические цепи выключающих, отключающих или сигнальных устройств.

По исполнению контактов реле тока и напряжения этих серий могут иметь три варианта: с одним замыкающим контактом; с одним

размыкающим контактом; с одним замыкающим и одним размыкающим контактами.

Общий вид реле РТ40 (РН50) приведен на рисунке 3.1 Магнитная система реле РТ40 состоит из шихтованного сердечника и подвижного якоря. В сердечнике электромагнита под катушками обмоток имеются вырезы, предназначенные для снижения вибрации подвижной системы при больших и несинусоидальных токах. На оси якоря закреплен полый барабанчик с радиальными перегородками внутри, заполненный кварцевым песком. Барабанчик представляет собой механический демпфер, который также служит для снижения вибрации подвижной системы при больших токах.

На сердечнике расположены две катушки, концы обмоток которых выведены на зажимы реле. Перестановкой перемычек на этих зажимах можно получать последовательное или параллельное соединение обмоток и соответственно изменять величину уставок в два раза. Цифры, нанесенные на шкале, соответствуют последовательному соединению обмоток.

Принцип действия электромагнитных реле основан на притяжении стальной подвижной системы к электромагниту при прохождении тока по его обмотке. Проходящий по обмотке электромагнита ток $I_р$ создает магнитодвижущую силу (МДС) $w_рI_р$, под действием которой возникает магнитный поток Ф, замыкающийся через магнитопровод электромагнита 1, воздушный зазор δ и подвижную систему 14 (якорь). Якорь намагничивается, появляется электромагнитная сила $F_э$, притягивающая якорь к полюсу электромагнита. Если сила $F_э$ преодолевает сопротивление пружины, то якорь приходит в движение и своим подвижным контактом 6 замыкает неподвижные контакты реле 17 (18). При прекращении или уменьшении тока $I_р$ до значения, при котором сила $F_э$ становится меньше силы $F_п$ сопротивления пружины 12 якорь возвращается в начальное положение, размыкая контакты 17 (18).

У реле с поворотным якорем и с поперечным движением электромагнитная сила $F_э$ образует вращающий момент:

$$M_э = F_эd_р = d_рk'(w^2_р / R^2_м)I^2_р = k''I^2_р, \qquad (3.1)$$

где d - плечо силы $F_э$.

Сила притяжения $F_э$ и ее момент $M_э$ пропорциональны квадрату тока $I^2_р$ в обмотке реле и имеют,следовательно, постоянное направление, не зависящее от направления (знака) этого тока.

Поэтому электромагнитный принцип пригоден для выполнения реле как постоянного, так и переменного тока и широко используется для изготовления измерительных реле тока, напряжения и вспомогательных реле логической части: промежуточных, сигнальных и реле времени.

Сила (момент), противодействующая движению подвижной системы реле, создается пружиной ($F_п$ и $M_п$), трением и тяжестью подвижной системы ($F_т$ и $M_т$).

Токи срабатывания и возврата реле, коэффициент возврата. Ток срабатывания. Реле начинает действовать, когда

$$F_э = F_{э.с.р} = F_п + F_т, \qquad (3.2)$$

или

$$M_э = M_{э.с.р} = M_п + M_т. \qquad (3.3)$$

Наименьший ток, при котором реле срабатывает, называется током срабатывания $I_{с.р}$.

В реле, выполняющих функции ИО, предусматривается возможность регулирования $I_{с.р}$ изменением числа витков обмотки реле (ступенями) и момента противодействующей пружины $M_п$ (плавно).

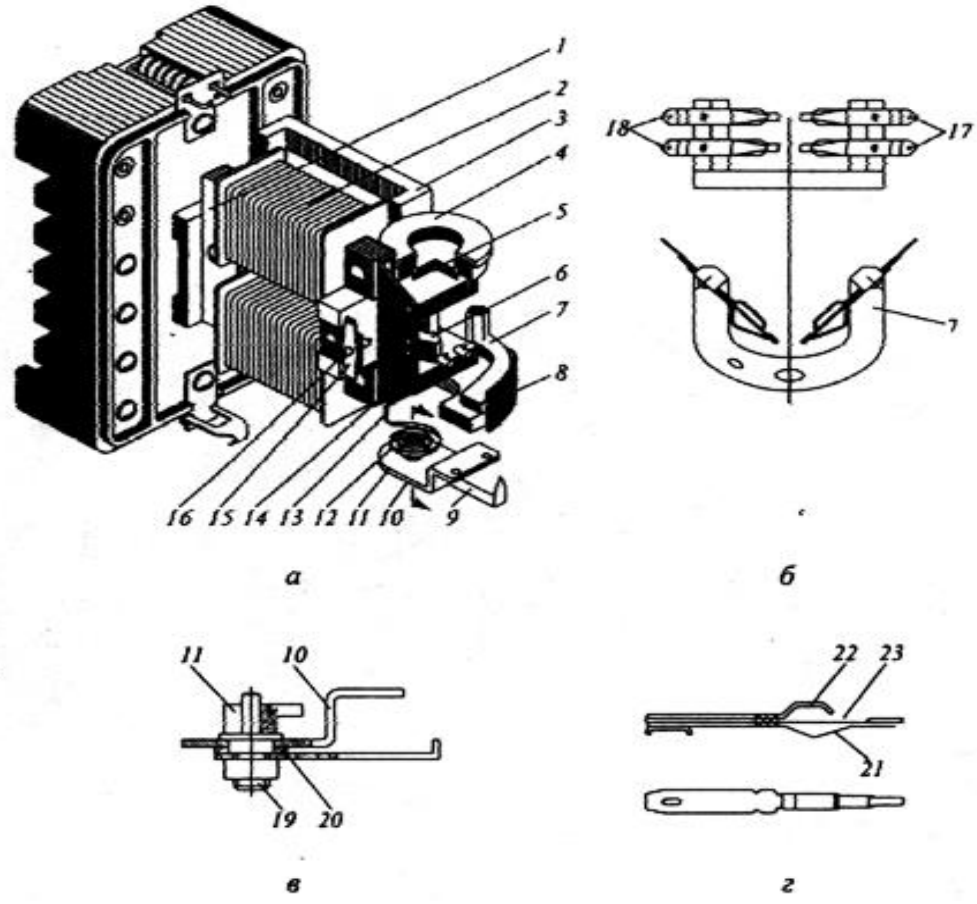
Ток возврата. Возврат притянутого якоря в исходное положение происходит при уменьшении тока в обмотке реле под действием пружины 12 (рисунок 3.1), когда момент $M_п$ преодолевает электромагнитный момент $M_{э.воз}$ и момент трения $M_т$.

Током возврата реле $I_{ВОЗ}$ называется наибольшее значение тока в реле, при котором якорь реле возвращается в исходное положение.

Коэффициент возврата. Отношение токов $I_{воз}$ / $I_{с.р}$ называется коэффициентом возврата $k_в$:

У реле, реагирующих на возрастание тока, $I_{с.р} > I_{воз}$ и $k_В < 1$.

$$k_в = \frac{I_{воз}}{I_{с.р}} = \sqrt{\frac{M_в}{M_{с.р}}}.$$

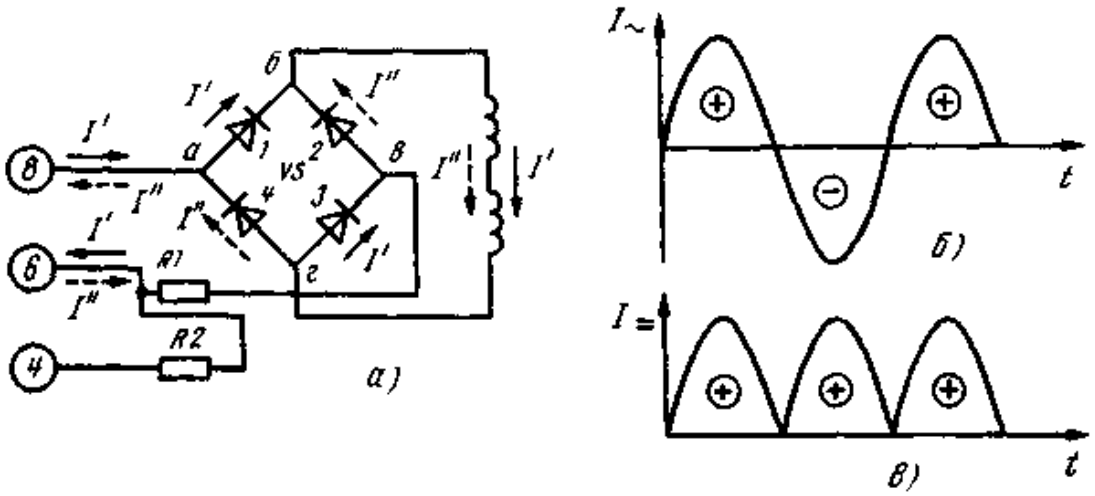


а — конструкция реле; *б* — изоляционная колодка с неподвижными контактами; в — регулировочный узел; г — контактный узел; 1 — сердечник; 2 — каркас с обмоткой; *3* — алюминиевая стойка; *4* — демпфер; 5 — верхняя полуось; б — подвижной контакт; 7 — изоляционная колодка; 8 — шкала уставок; 9 — указатель уставки; *10* — пружинодержатель; *11* — шестигранная втулка; *12* — спиральная пружина; *13* — хвостовик;*14* — якорь; *15* — фасонная пластинка;*16* — левый упор; *17* — правая пара неподвижных контактов; *18* — левая пара неподвижных контактов.

Рисунок.3.1-Общий вид реле РТ40 (РН50)

Реле напряжения. Выпускаемые реле напряжения переменного тока типов РН-53 и РН-54 выполнены конструктивно так же, как реле РТ-40. Для уменьшения вибрации обмотка реле включается на напряжение U_p через выпрямитель (рисунок 3.3). Обмотка реле напряжения имеет большое активное сопротивление.

Реле максимального напряжения типа РН-53 имеет $k_в$ не ниже 0,8, а реле минимального напряжения типа РН-54 - не выше 1,25. Уставки реле напряжения регулируются с помощью поводка, изменяющего натяжение противодействующей пружины, а также с помощью включения одного или двух дополнительных резисторов в цепи обмотки реле, что изменяет предел шкалы уставок в 2 раза.



а) схема включения обмоток; б) переменный ток на входе выпрямителя;
в) выпрямленный ток в обмотке реле.

Рисунок 3.3 - Схема включения обмоток реле максимального и минимального напряжения через выпрямитель

Назначение реле логики и требования к ним. Промежуточные реле применяются для выполнения логических операций как реле-повторители для одновременного замыкания или размыкания нескольких цепей, а также для замыкания и размыкания цепей с большими токами.

Примеры использования промежуточных реле в схемах РЗ приведены на рисунке 3.4. По способу включения промежуточные реле подразделяются на реле параллельного (рисунок 3.4,а) и последовательного (рисунок 3.4,б) включения. Обмотки первых включаются на полное напряжение источника питания, а вторых — на ток цепи последовательно с катушкой электромагнита отключения выключателя VAT или какого-либо другого аппарата или реле.

Кроме того, выпускаются реле с дополнительными удерживающими катушками, например, реле параллельного включения с удерживающей обмоткой, включаемой последовательно в управляемую контактами реле цепь (рисунок 3.4,в). Такое реле, подействовав от кратковременного импульса, поданного в параллельно включенную обмотку, остается в сработанном состоянии после его исчезновения под действием тока удержания, пока не сработает управляемый аппарат.

Мощность контактов должна быть достаточной для замыкания и размыкания цепей РЗ, а также для замыкания цепей управления выключателей.

Реле рассматриваемых типов имеют по пять контактов, которые могут быть использованы в различных комбинациях. Время срабатывания этих реле составляет примерно 0,06 с. Реле постоянного тока изготовляются на напряжения 24, 48, 110 и 220 В, а переменного тока - на 100, 127 и 220 В.

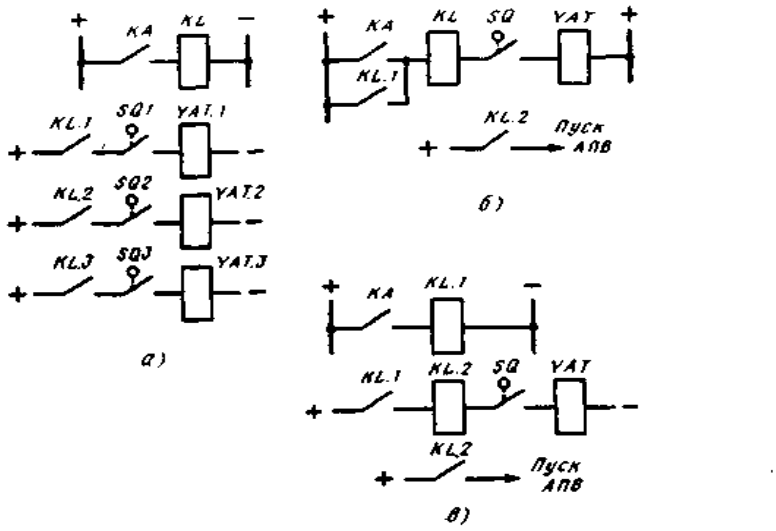
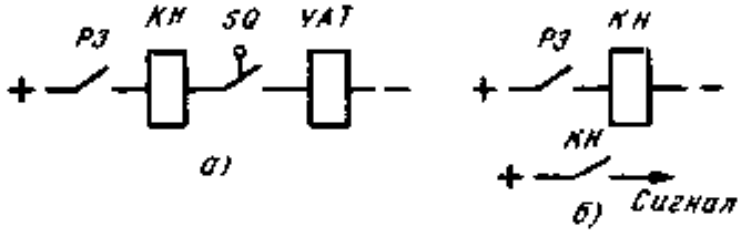


Рисунок 3.4 - Схема включения промежуточных реле

Указательные реле. Указательные реле служат для фиксации действия РЗ в целом или ее структурных частей (элементов).



а) последовательное включение; б) параллельное включение.
Рисунок 3.5 - Схемы включения указательных реле

Ввиду кратковременности прохождения тока в обмотке указательных реле они выполняются так, что сигнальный флажок и контакты реле остаются в сработанном состоянии до тех пор, пока их не возвратит на место обслуживающий персонал.

Указанные реле изготовляются для последовательного (рисунок 3.5,а) и параллельного (рисунок 3.5, б) включения.

Реле времени. Назначение и основные требования. Реле времени служит для искусственного замедления действия устройств РЗ и электроавтоматики. Время, проходящее с момента подачи напряжения на обмотку реле времени до замыкания его контактов, называется выдержкой времени реле.

Основным требованием, предъявляемым к реле времени, применяемым в схемах РЗ, является точность. Погрешность во времени

действия реле со шкалой до 3,5 с не должна превышать + 0,06 с, а при больших выдержках времени, устанавливаемых на реле со шкалой 20-30 с, ± 0,25 с.

Реле времени на постоянном токе должно надежно срабатывать начиная с 80% номинального напряжения, а на переменном - с 85%. Выдержка времени не должна зависеть от возможных в эксплуатации колебаний оперативного напряжения. Потребление обмотки электромагнитных реле времени составляет 20-30 Вт.

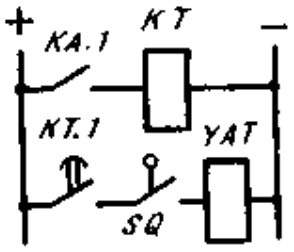


Рисунок 3.6 - Схема включения реле времени

Реле времени серий РВ-100, РВ-200. По принципу исполнения это электромагнитные реле мгновенного действия с задерживающим часовым механизмом. Они срабатывают после того, как контактами управляющего реле КА1 (на рисунке 3.6) замыкается цепь катушек электромагнита постоянного (РВ-100) или переменного тока (РВ-200, кроме тех, у которых последняя в обозначении типа цифра 5). Втягивается якорь реле и пускает в ход часовой механизм, обеспечивающий замыкание контактов реле с заданной заранее выдержкой времени.

Реле РВ-100 выпускаются на все стандартные номинальные напряжения постоянного оперативного тока: 24, 48, НО и 220 В. Реле РВ-200 выпускаются на все номинальные напряжения переменного оперативного тока: 100, 127, 220, 380 В, а также 110 В. Все реле времени переменного тока являются термически стойкими, т. е. они могут длительно находиться под напряжением, на 10% превышающим номинальное значение.

4 Лекция №4. Индукционные реле тока

Содержание лекции: индукционные реле тока, основные физические процессы, применяемые в конструкции реле.

Цель лекции: получить представление о принципе действия индукционных реле тока.

Прежде чем приступить к описанию реле серий РТ-80 и РТ-90, целесообразно вспомнить принципы действия электромагнитных и

индукционных реле тока, так как в рассматриваемых реле сочетаются оба принципа.

В электромагнитных релепереключение контактов происходит под действием электромеханической силы притяжения ферромагнитного якоря к электромагниту.

На рисунке 4.1 показано схематическое устройство электромагнитного реле тока. На магнитопровод 1 насажена катушка 2. Ток $I_{Р}$, протекающий по ней, создает магнитный поток $Ф_{м}$, который замыкается по контуру: магнитопровод, воздушные зазоры, якорь 3. Направление магнитных силовых линий определяется по известному правилу буравчика. Нетрудно видеть, что при любом направлении тока магнитопровод и якорь представляют два магнита, обращенные друг к другу разноименными полюсами. Так, на рисунке магнитные силовые линии направлены в магнитопроводе от правого полюса к левому, а в якоре - от левого к правому.

Поэтому между якорем и магнитопроводом возникает сила притяжения. При определенном токе, называемом током срабатывания, эта сила преодолевает силу притяжения возвратной пружины 4. Тогда якорь притянется к магнитопроводу, замкнув контакт 5. Размыкание контакта и возврат реле в исходное положение происходит при снижении тока до тока возврата. При этом токе сила притяжения становится меньше силы пружины.

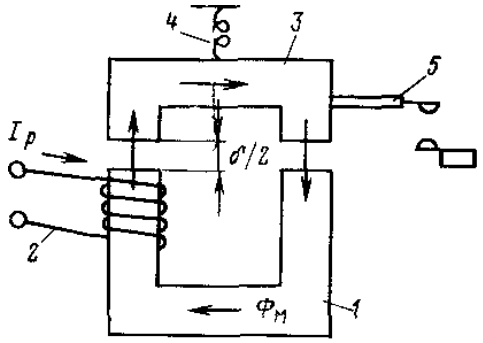


Рисунок 4.1 - Устройство электромагнитного реле

Срабатывание и возврат происходят при равенстве электромагнитной силы притяжения противодействующей силе. Если увеличить число витков, то во столько же раз уменьшится ток. Сила притяжения обратно пропорциональна квадрату размера воздушного зазора δ. Поэтому в начале движения якоря с уменьшением зазора эта сила резко возрастает, и якорь движется с большим ускорением. Процесс срабатывания протекает сотые доли секунды, т. е. изменение состояния реле происходит скачком. По этой же причине ток возврата реле меньше его тока срабатывания. Отношение тока возврата к току срабатывания реле называется коэффициентом возврата.

Уменьшение противодействующей силы ведет к уменьше-
нию тока срабатывания и тока возврата. Таким образом, ток срабатывания

реле можно регулировать числом витков, размером зазора и натяжением пружины.

В индукционных реле подвижной частью служит алюминиевый диск или барабанчик, укрепленный на оси и поворачивающийся под действием вращающего момента. Вращающий момент является результатом взаимодействия магнитных потоков с наведенными ими в диске или барабанчике вихревыми токами. Поместим диск в зазорах двух электромагнитов, по катушкам которых протекают переменные токи I_1 и I_2 (рисунок 4.2). Каждый ток создает магнитный поток, пронизывающий диск. Если известны положительные направления токов (обозначены стрелками), то по правилу «буравчика» легко определить направления потоков. При вращении рукоятки по направлению тока движение буравчика совпадает с направлением силовых линий. Если смотреть на диск сверху, то поток $Ф_1$ создаваемый током I_1, направлен от наблюдателя (крестик - хвост летящей стрелы); поток $Ф_2$, создаваемый током I_2, направлен к наблюдателю (точка - острие летящей стрелы).

Если изменения токов происходят синусоидально, то таким же образом изменяются магнитные потоки. Но тогда, согласно закону электромагнитной индукции, в диске должны наводиться ЭДС и циркулировать вихревые токи (токи трансформации). Вокруг следа полюсов первого электромагнита образуется контур с током $\mathbf{I_{1Д}}$ вокруг следа полюсов второго электромагнита $\mathbf{I_{2Д}}$. Направления этих токов определяются опять по правилу буравчика: если буравчик движется по направлению потока, рукоятка вращается по направлению тока.

Как известно, между магнитным потоком и током, находящимся в его поле, возникают электромеханические силы взаимодействия. Так как здесь мы имеем два потока и два контура с током, то необходимо рассмотреть четыре силы. Направления этих сил определяются по правилу «левой руки».

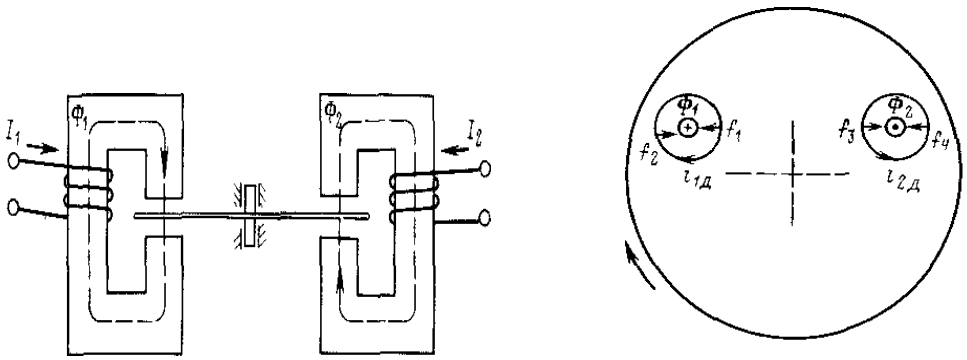


Рисунок 4.2 - Принцип действия индукционного реле

Результирующая сила взаимодействия потока $\mathbf{Ф_1}$ с током $\mathbf{i_{1Д}}$ при симметрии магнитного потока равно нулю, потому что она представляет

сумму взаимно уравновешенных сил левой и правой половины контура. Точно так же равна нулю и сила взаимодействия потока Φ_2 со «своим» током $\mathbf{i_{2Д}}$ (на рисунке 4.2 эти силы не показаны.) Отсюда следует, что в индукционных реле и приборах должно быть не менее двух потоков.

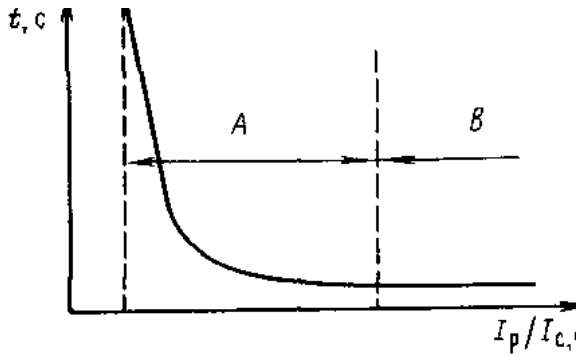
Иной результат получается при взаимодействии потока Φ_2 с током $i_{1Д}$. Токи в левой и в правой половинах контура противоположны. Поэтому правая часть контура отталкивается от потока Φ_2 с силой f_1 а левая - притягивается к нему с силой f_2. Но поскольку правая половина расположена от оси магнитного потока ближе, чем левая, то $f_1>f_2$ и равнодействующая $F_1=f_1-f_2$ направлена влево. Рассматривая аналогично взаимодействие потока Φ_1 с током $i_{2Д}$, устанавливаем, что $F_2=f_3-f_4$ направлена вправо. Итак, мы имеем две силы, направленные противоположно: F_1 - сила взаимодействия тока $i_{1Д}$ с потоком Φ_2 и F_2 -сила взаимодействия тока $\mathbf{i_{2Д}}$ с потоком Φ_1.

Если магнитные потоки сдвинуты по фазе, то равнодействующая сила не равна нулю. Можно доказать, что она всегда направлена от оси опережающего магнитного потока к оси отстающего. Иными словами, отстающий магнитный поток притягивает контур с током, созданным опережающим магнитным потоком. Равнодействующая сила $F_Р=F_1 - F_2$ создает вращающий электромагнитный момент $М_Э = F_Р d$, где d - плечо силы.

Вращающий момент пропорционален магнитным потокам и синусу угла сдвига между ними

$$M_Э = k\Phi_1\Phi_2 \sin\psi. \qquad (4.1)$$

В диске наводится ЭДС, пропорциональная частоте вращения. Под ее действием возникают контуры с током. Электромеханическая сила взаимодействия этих токов с потоком создает тормозной момент, значительно превосходящий вышеперечисленные.



а) зависимая часть; в) независимая часть.

Рисунок 4.3- Зависимость времени срабатывания реле от тока

Поэтому с достаточной точностью можно считать, что Мт = к"ω. При постоянной частоте, откуда

$$\omega = k^1/к" \cdot I^2_р. \qquad (4.2)$$

Следовательно, частота вращения пропорциональна квадрату тока.

Как только ток $I_р$ достигнет тока срабатывания реле, ось диска свяжется червячной передачей с толкателем, воздействующим на контакты так, что их переключение происходит после определенного числа оборотов. Таким образом, создается логический элемент «время» без использования часового механизма.

При заданном числе оборотов выдержка времени обратно пропорциональна квадрату тока. Зависимость времени срабатывания реле от тока представлена на рисунке 4.3. Характеристика имеет зависимую и независимую части. Переход характеристики в независимую часть при определенном токе объясняется насыщением магнитопровода.

Дальнейшее увеличение тока не приводит к возрастанию магнитного потока. Поэтому частота вращения не увеличивается. Согласно принятой терминологии реле имеет ограниченно-зависимую характеристику выдержки времени.

Конструкция реле. Рассмотрим конструкцию индукционного реле на примере реле типа РТ-81 (рисунок 4.4). Цоколь реле изготовляется из немагнитного сплава путем отливки. Он имеет приливы для крепления деталей. В пазы цоколя уложена резиновая уплотняющая прокладка. В верхней части цоколя в прямоугольном вырезе запрессована контактная колодка 5 с зажимами. Для крепления реле цоколь снабжен двумя отверстиями с резьбой.

Кожух реле первых выпусков представлял собой железный каркас со стеклянным окошком. Он оказывает влияние на распределение магнитных потоков. В верхней его части расположен поворотный рычажок с возвратной пружиной и фасонным винтом, служащий для установки сигнального флажка в исходное положение.

Магнитопровод реле является общим для индукционного и электромагнитного элементов. Он имеет две ветви и делит магнитный поток на две составляющие. Основная ветвь (собственно магнитопровод) 16 представляет прямоугольник с воздушным зазором, образованным полюсами. Полюсы магнитопровода разделены на две части таким образом, что часть каждого полюса охвачена короткозамкнутым витком (экраном) 4; назначение экранов объяснено ранее.

Другая ветвь магнитопровода - это магнитный шунт 15,образующий магнитную цепь совместно с якорем отсечки и его правым воздушным зазором. Катушка реле 12 - это измерительный орган, включаемый во вторичную обмотку трансформатора тока. По катушке протекает ток,

пропорциональный току защищаемого присоединения. Катушка насажена на правый стержень магнитопровода. Один ее конец выведен на контактную колодку, а отпайки - на семь гнезд штепсельного мостика 13, который также имеет вывод на контактную колодку.

Гнезда имеют обозначения токов срабатывания. В одно из них ввернут винт 14 с фасонной пластмассовой головкой. Винт снабжен пружинящей шайбой, предотвращающей нарушение контакта в случае усыхания карболита штепсельного мостика. Восьмое гнездо является холостым, в него ввернут запасной винт.

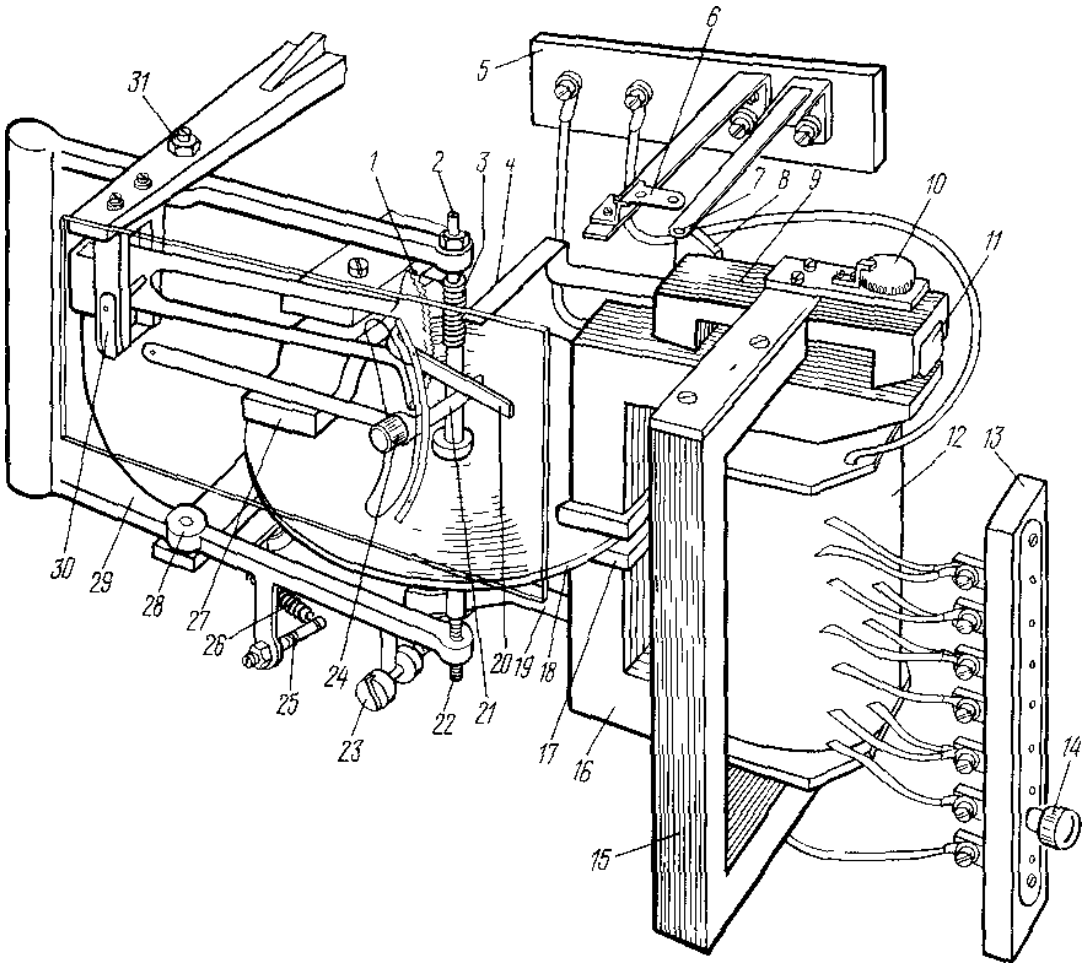
Якорь отсечки 9 представляет неуравновешенное коромысло, ось которого укреплена на шунте магнитопровода. На левом, более тяжелом плече, укреплены фигурный рычаг 4 и текстолитовая пластина 8, Посредством фигурного рычага осуществляется воздействие индукционного элемента на якорь и на сигнальный флажок. Текстолитовая пластина непосредственно переключает контакты.

Вибрация якоря отсечки в притянутом состоянии, вызванная пульсацией магнитного потока, может привести к неустойчивому замыканию контактов. Для устранения этого нежелательного явления на правый конец якоря насажен короткозамкнутый виток 11, охватывающий часть его торцевой стороны.

Магнитный поток расщепляется на две составляющие, сдвинутыепо фазе, что приводит к сглаживанию пульсации. Для предотвращения залипания якорь снабжен немагнитной заклепкой.

Как установлено ранее, ток срабатывания электромагнитного элемента можно регулировать воздушным зазором. Для этой цели предназначен фасонный винт 10. На нем укреплено кольцо со шкалой, программированной в кратностях тока срабатывания отсечки току срабатывания индукционного элемента. Например, цифра 6 на шкале отсечки совмещена с неподвижной риской, а уставка индукционного элемента - 5 А. Следовательно, уставка отсечки 30 А. Кольцо со шкалой закреплено стопорным винтом. Ослабив винт, можно повернуть кольцо.

Постоянный магнит 27 является составной частью магнитной системы реле. Он создает тормозной момент, пропорциональный частоте вращения диска, что необходимо для получения стабильных характеристик реле. Этим, однако, не исчерпываются функции постоянного магнита. Он участвует в создании системы сил, действующих на подвижную часть реле и вызывающих его срабатывание.



1 - зубчатый сектор; 2 - верхняя опора диска; 3 - червяк; 4 - фигурный рычаг; 5 - контактная колодка; 6 - неподвижный контакт; 7 - подвижный контакт; 8 -текстолитовая пластина; 9 - якорь отсечки; 10 - регулировочный винт отсечки; 11 - короткозамкнутый виток якоря; 12 - катушка; 13 - штепсельный мостик; 14 - штепсельный винт; 15 - шунт магнитопровода; 16 - магнитопровод; 17 экраны; 18 - диск; 19 - скоба; 20 - толкатель; 21 - упор; 22 - нижняя опора диска; 23 - упорный винт; 24 - фасонный винт; 25 - регулировочный винт пружины; 26 -г пружина; 27 - постоянный магнит; 28 - нижняя опора рамки; 29 - рамка; 30 полуось сектора; 31 - верхняя опора рамки.

Рисунок 4.4 - Устройство реле типа РТ-81

И наконец, магнит останавливает вращение диска после сброса тока, сводя к минимуму инерционный выбег реле. Тормозной магнит крепится к приливу цоколя осевым винтом и фиксируется тремя стопорными винтами. При отпускании стопорных винтов положение магнита можно изменять.

Подвижная часть индукционного элемента представляет алюминиевый диск 18, вращающийся между полюсами магнитов. Ось диска установлена на двух опорах в поворотной рамке 29. В свою очередь, поворотная рамка также на опорах 28, 31 двух полуосей установлена в приливах цоколя. Ось диска имеет утолщение, на котором нарезан одно- или четырехзаходный червяк 3.

Вторым элементом червячной пары служит зубчатый сектор 1, поворачивающийся на двух полуосях 30. Сектор снабжен толкателем 20,

воздействующим на якорь отсечки. Упор 21, на котором лежит толкатель, определяет его исходное положение. Упор фиксируется фасонным винтом 24, выведенным вместе с указателем в прорезь со шкалой времени на щитке реле. Его положением устанавливается выдержка времени. Время на шкале указано в независимой части характеристики.

Крайние положения поворотной рамки ограничены упорным винтом 23. Винт закреплен контргайкой. При отпущенной контргайке винт имеет ход около 3 мм, необходимый для регулировки глубины зацепления червяка с сектором. Рамка оттянута в крайнее положение возвратной пружиной 26 с винтом 25, служащим для регулировки ее натяжения. Рамка заканчивается стальной скобой 19, которая за счет притяжения к магнитопроводу обеспечивает надежное сцепление червячной передачи. Скобу можно слегка подгибать и отгибать, регулируя тем самым коэффициент возврата.

Механический указатель срабатывания выполнен в виде фигурного коромысла с красным кружком справа.

Теперь рассмотрим, как происходит работа реле. При токе около 20 % тока уставки диск, преодолевая момент силы трения, начинает вращаться, как было объяснено ранее. При этом возникают дополнительные моменты и усилия. В диске, пересекающем магнитные силовые линии постоянного магнита, наводится ЭДС и циркулируют токи, препятствующие вращению. Их взаимодействие с полем постоянного магнита создает тормозной момент $M_{\mathbf{т}}$. Диск пересекается потоком электромагнита, в результате этого наводится ЭДС «резания» и циркулируют токи «резания». Они создают момент $M_{\mathbf{рез}}$, также препятствующий вращению. Когда рабочий момент уравновесится тормозными моментами, частота вращения установится постоянной. Для упрощения пренебрежем силой, вызванной токами «резания». Тогда можно считать, что на диск действуют две силы, стремящиеся повернуть рамку, $F_{\mathbf{1}}$- сила, созданная электромагнитом, и $F_{\mathbf{2}}$- сила тормозного магнита. Интересно отметить, что на вращение диска эти силы оказывают противоположное действие, а на рамку они действуют согласно. Их равнодействующая, приближенно равная $2F_{\mathbf{2}}$ приложена к оси рамки. Теперь становится ясным основное назначение постоянного магнита. Если бы он отсутствовал, уравновешенные силы были бы приложены к одной точке, а их равнодействующая равнялась нулю.

С увеличением тока возрастает частота вращения. Одновременно возрастают силы F_1 и F_2. Наконец, при токе уставки рамка поворачивается, и зубчатый сектор приходит в зацепление с червяком. С этого момента начинается отсчет времени срабатывания. Теперь возрастает сила трения, стремящаяся вызвать расцепление. Но значительно возрастет и удерживающая сила F_1 из-за уменьшения зазора между скобой и магнитопроводом.

Итак, при дальнейшем вращении диска сектор с толкателем движется вверх.

Придя в соприкосновение с фигурным рычагом 4 (рисунок 4.5), он поворачивает якорь отсечки. Правый зазор якоря уменьшается, и

возрастающая сила электромагнитного притяжения ускоряет движение якоря. Текстолитовая пластина якоря переключает контакты, а фигурный рычаг выталкивает механический указатель срабатывания.

После исчезновения тока подвижные части реле кроме механического указателя срабатывания возвращаются в исходное положение: рамка - возвратной пружиной, якорь - собственной массой.

При токе уставки отсечки электромагнитный элемент работает самостоятельно: срабатывание реле происходит без выдержки времени. При необходимости отсечка может быть выведена из работы вывинчиванием винта 10 до упора.

5 Лекция №5. Источники и схемы оперативного тока

Содержание лекции: источники и схемы оперативного тока.

Цель лекции: получить представление о назначении, требованиях и видах источников оперативного тока.

Назначение и основные требования. Источники оперативного тока осуществляют питание цепей дистанционного управления выключателями, устройств РЗ, автоматики и других средств управления.

Питание оперативных цепей управления, цепей РЗ и других устройств, от которых зависит отключение поврежденных элементов энергосистемы и ликвидация ненормальных режимов, должно отличаться особой надежностью. Поэтому главное требование, которому должен отвечать источник оперативного тока, состоит в том, чтобы во время любых повреждений и ненормальных режимов напряжение источника оперативного тока и его мощность всегда имели достаточное значение как для безотказного действия устройств РЗ, автоматики, телемеханики и сигнализации, так и для надежного отключения и включения соответствующих выключателей.

Для питания оперативных цепей применяются источники постоянного и переменного тока.

Постоянный оперативный ток. В качестве источника постоянного тока служат аккумуляторные батареи с номинальным напряжением 220—110 В; на небольших подстанциях иногда применяются батареи 48 В. От аккумуляторных батарей осуществляется централизованное питание всех устройств РЗ, автоматики, цепей управления и сигнализации.

Аккумуляторная батарея GB подключается к сборным шинам (рисунок 6), от которых получают питание все потребители постоянного тока. Аккумуляторные батареи обычно работают в режиме постоянного подзаряда, что позволяет обеспечить их непрерывную готовность к действию в полностью заряженном состоянии. Для этой цели на сборные шины параллельно GB включается постоянно работающее подзарядное устройство (ПУ). Первоначально подобные устройства выполнялись в виде генератора постоянного тока, приводимого в действие электродвигателем, получающим

питание от сети переменного тока; в последнее время стали применяться полупроводниковые выпрямители.

Самым ответственным участком являются цепи РЗ и автоматики, цепи управления силовыми выключателями и их электромагнитов отключения (ЭО) - они получают питание от шинок, называемых шинками управления ШУ. Вторым по значению участком являются цепи электромагнитов включения(ЭВ) выключателей, питающиеся также от отдельных шинок ШВ. Третьим по значению участком, менее ответственным, является сигнализация, питающаяся от шинок ШС. Остальные потребители постоянного тока (аварийное освещение, некоторые электродвигатели собственных нужд) образуют четвертый участок, питающийся от отдельной шинной сборки или непосредственно от сборных шин; шинки ШУ, ШВ, ШС по соображениям надежности секционируются.

На ЭС и крупных узловых ПС главные сборные шины питания цепей управления для повышения надежности (при повреждениях на главных шинах) выполняются в виде двух секций (рисунок 5), каждая из которых получает питание от аккумуляторной батареи через автоматические выключатели или предохранители.

Потребители, подключенные к шинкам ШУ, ШВ, ШС, подразделяются на участки по территориальному принципу (РУ 220, 110 кВ; щит управления и т. п.). Каждый такой участок питается по кольцевой схеме не менее чем по двум линиям, отходящим от разных секций соответствующих шинок.

Все линии и подключенные к ним элементы должны иметь надежную защиту от КЗ. Она выполняется предохранителями FQ или автоматическими выключателями. На главной питающей цепи и идущей от батареи GB на сборные шины также устанавливается автоматический выключатель SF или предохранитель. Характеристики времени действия всех предохранителей и автоматических выключателей должны согласовываться и обеспечивать селективность отключения поврежденного элемента при КЗ в сети постоянного тока. Ток срабатывания защитных устройств отстраивается от максимального тока нагрузки и должен обеспечивать их действие при КЗ в конце следующего резервируемого участка.

Для выявления неисправностей в сети постоянного тока предусматриваются специальные устройства контроля. В сетях постоянного тока возможны замыкания на землю. В случае замыканий на землю в двух точках контакты *РЗ* шунтируются и в электромагните отключения YAT появляется ток, под действием которого выключатель может ложно отключиться.

Чтобы предупредить подобные отключения, применяется контроль за появлением «земли» на постоянном токе. Аккумуляторные батареи являются самым надежным источником питания устройств РЗ, так как они готовы к действию в любой момент времени с необходимым уровнем напряжения и

мощности независимо от состояния основной сети переменного тока. В то же время у аккумуляторных батарей имеются и недостатки.

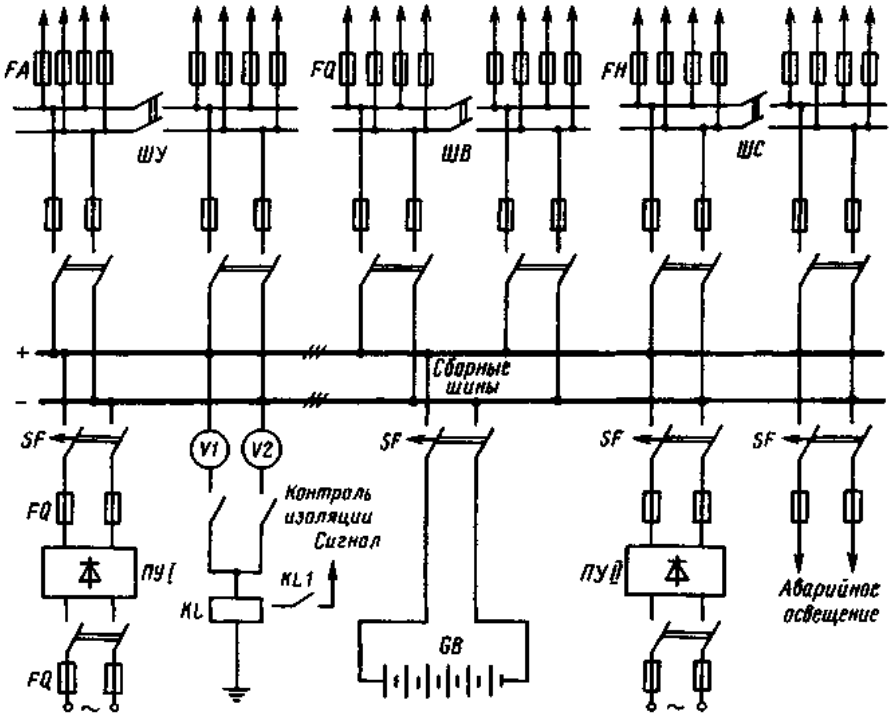


Рисунок 5.1- Принципиальная схема питания оперативных цепей РЗ, управления и сигнализации оперативным постоянным током

Вследствие высокой надежности они устанавливаются на всех ЭС и на ПС с напряжением 110 кВ и выше. Они значительно дороже других источников оперативного тока, для них требуются подзарядные установки, специальные помещения, для их обслуживания необходим квалифицированный персонал. Из-за централизации питания создается сложная, протяженная, дорогостоящая и требующая большого количества контрольного кабеля сеть постоянного тока.

В связи с этим на ПС в распределительных сетях 6, 10, 35, а иногда и 110 кВ получили применение источники переменного оперативного тока.

Переменный оперативный ток. Для питания оперативных цепей переменным током используется ток или напряжение первичной сети. В качестве источника переменного оперативного тока служат трансформаторы тока (ТТ), трансформаторы напряжения (ТН) и трансформаторы собственных нужд (ТСН).

Трансформаторы тока (ТТ) являются надежным источником питания оперативных цепей РЗ от КЗ. Вторичный ток ТТ при КЗ резко возрастает, соответственно увеличиваются вторичные напряжение и мощность ТТ, что и обеспечивает надежное питание оперативных цепей при КЗ. Однако при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся

увеличением тока на защищаемом присоединении, ток и мощность ТТ оказываются недостаточными для действия логических элементов РЗ и срабатывания выключателей. По тем же причинам ТТ нельзя использовать для дистанционного управления выключателями в нормальном режиме, а также при отсутствии напряжения (и тока) на защищаемом объекте.

Трансформаторы напряжения (ТН) и собственных нужд (ТСН), подключенные к сети, питающей защищаемый объект, непригодны для питания оперативных цепей РЗ от КЗ, так как при КЗ напряжение в этой сети резко снижается. При повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся понижениями напряжения в сети, ТН и ТСН могут использоваться для питания РЗ от перегрузки и от замыканий на землю.

По сравнению с аккумуляторной батареей источники переменного оперативного тока имеют меньшую стоимость, требуют менее сложного обслуживания и не нуждаются в специальном помещении.

Недостатком источников оперативного переменного тока является ограниченная мощность, как правило, недостаточная для отключения выключателей в сетях напряжением выше 35 кВ с применяемыми в отечественной практике электромагнитными и пневматическими приводами.

6 Лекция № 6. Устройства РЗА на микроэлектронной элементной базе. Основные узлы реле защиты, выполненные на операционных усилителях

Содержание лекции: ознакомление с устройствами РЗА на микроэлектронной элементной базе.

Цель лекции: назначение основных логических элементов в релейной защите.

До последнего времени все органы релейной защиты выполнились только с помощью электромеханических реле. Нередко новые требования к релейной защите не могут быть удовлетворены из-за несовершенства аппаратуры, содержащей электромеханические устройства. Стало очевидным, что использование электромеханических устройств в релейной аппаратуре задерживает дальнейшее развитие техники релейной защиты, как в качественном, так и в количественном отношениях.

Один из возможных выходов из создавшегося положения открылся благодаря успехам современной полупроводниковой схемотехники, а в первую очередь – созданию интегральных микросхем, которые и стали основой для создания нового поколения релейной защиты.

Интегральные микросхемы относятся к категории электронных устройств средней степени интеграции, реализующих одну или несколько однородных функций.

Представим себе такой идеальный логический элемент (рисунок 6.1) в виде некоторого переключающего устройства, обладающего несколькими входными зажимами X_1, X_2, X_3., . . , X_n и одним выходным зажимом Y.

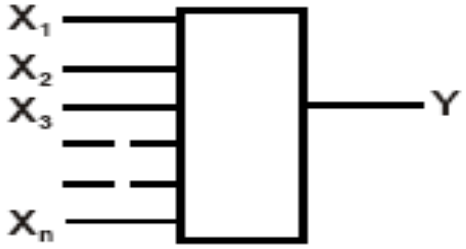
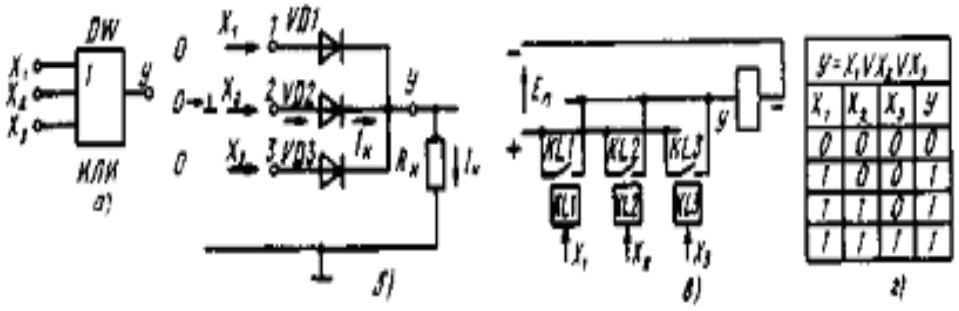


Рисунок 6.1 - Общее условное изображение логического элемента

За исходное состояние элемента примем такое, когда на его входные зажимы поданы нулевые сигналы и когда его переключение происходит после поступления на его входы некоторого сочетания единичных сигналов. Такие элементы зовутся элементами «единичной» или «положительной» логики. Если в исходном состоянии к элементам подводятся единичные сигналы, то их называют элементами «нулевой» или «отрицательной» логики. В наших примерах рассматриваются элементы «положительной» логики.

Операции ИЛИ. У идеального элемента, обеспечивающего выполнение операции ИЛИ при нулевых сигналах на всех его выходах, выходной сигнал имеет тоже нулевое значение. Если хотя бы на одном из входных зажимов подается единичный сигнал, элемент немедленно подействует, и на его выходе установится единичный сигнал. Единичный сигнал на выходе сохранится при любом числе сигналов 1, поданных на его входы. Когда со всех входных зажимов сигналы 1 снимаются, выходной сигнал ИЛИ опять становится нулевым. На структурных схемах элемент ИЛИ принято изображать так, как показано на рисунке 6.2, а.

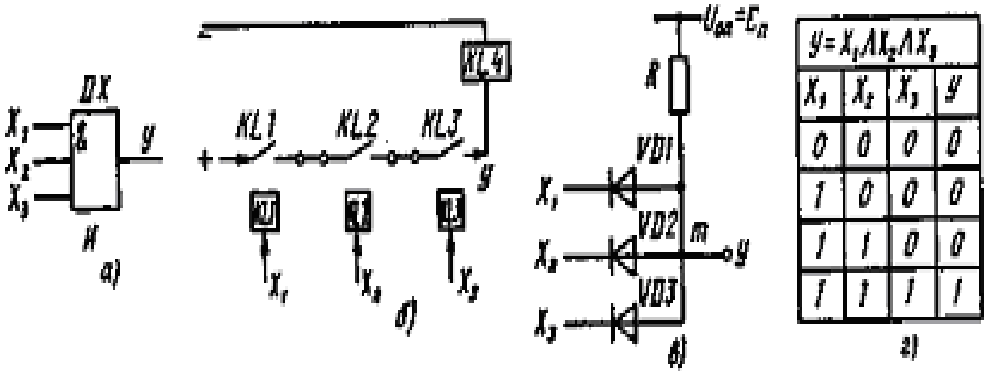


а) условное обозначение; б) на полупроводниковых элементах; в) на электромеханических элементах; г) таблица соответствия.

Рисунок 6.2 - Логический элемент ИЛИ

Операции И. Элемент, осуществляющий операцию И, при нулевых сигналах на всех его входных зажимах имеет на выходном зажиме сигнал 0. Но в отличие от элемента ИЛИ этот элемент переключится только тогда, когда единичные сигналы поступят на все его входы.

Только при этом условии на его выходном зажиме образуется сигнал 1. В случаях, когда единичные сигналы поступят только на часть входных зажимов, на выходе элемента И будет оставаться нулевой сигнал. После срабатывания элемента И сигнал 1 на его выходе будет сохраняться до тех пор, пока не снимается единичный сигнал хотя бы с одного из его входных зажимов.

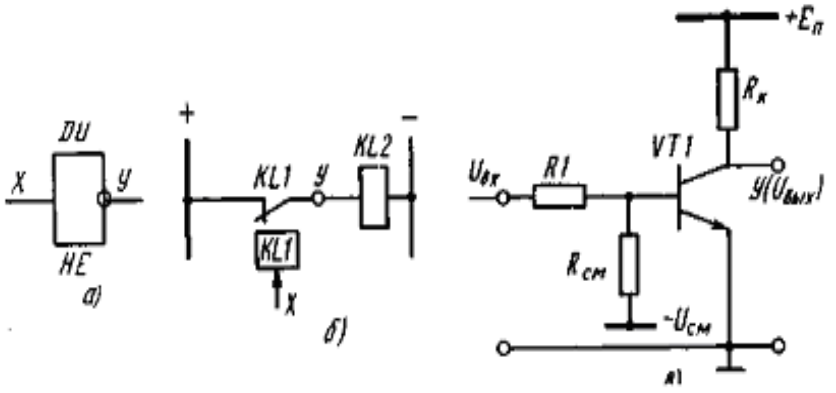


$y = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3$			
X_1	X_2	X_3	y
0	0	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0
1	1	1	1

а) условное изображение; б) на электромеханических элементах;
в) на полупроводниковых элементах; г) таблица соответствия.
Рисунок 6.3- Логический элемент И

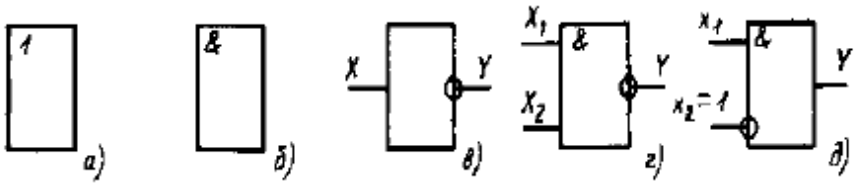
На структурных схемах элемент И изображается так, как дано на рисунке 6.3, а.

Операция НЕ или ИНВЕРСИЯ. В исходном положении элемента НЕ принято, что на его единственном входном зажиме X имеется нулевой сигнал, при этом на его выходном зажиме Y держится единичный сигнал. В случае появления на входном зажиме единичного сигнала сигнал на выходе элемента НЕ принимает нулевое значение. Действие элемента НЕ называют в математической логике инвертированием сигнала или инверсией, а сам элемент – инвертором. Для его изображения применяется прямоугольник с небольшим кружочком, нанесенным посредине правой или левой его стороны.



а) условное изображение; б) на электромеханических элементах;
в) на полупроводниковых элементах; г) таблица соответствия.
Рисунок 6.4- Логический элемент НЕ

На структурных схемах элемент НЕ изображается так, как дано на (рисунке 6.4, а.)



а) элемент ИЛИ; б) элемент И; в) элемент НЕ; г) элемент И-НЕ; д) элемент ЗАПРЕТ.
Рисунок 6.5 -Условные изображения логических элементов

Для промышленной автоматики изготовляют серийные логические микросхемы, представляющие собой набор из сложных элементов и предназначенные для одновременного выполнения операций И и НЕ. Такой элемент сокращенно записывается так: элемент И-НЕ.

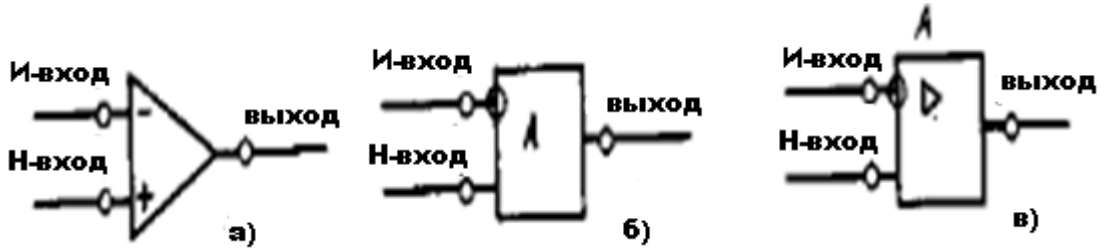
Изображение элемента И-НЕ приведено на рисунке 6.5, г. Ниже дана таблица переключений для элемента И-НЕ; в целях упрощения принято, что элемент имеет всего два входа X_1 и X_2:

Состояние элемента	X_1	X_2	Y
Исходное	0	0	1
Поданы сигналы	1	0	1
	0	1	1
	1	1	0

Как видно, мы приняли за исходное состояние такое, когда на входы элемента поданы нулевые сигналы, что соответствует «положительной»

логике, применяемой в промышленной автоматике. Если представить себе, что в исходном положении на оба входа поданы сигналы 1, то на выходе установится сигнал 0 (нижняя строка таблицы). И тогда достаточно заменить хотя бы один из входных сигналов нулевым, чтобы на выходе появился сигнал 1. А такое действие элемента представляет собой уже операцию ИЛИ-НЕ, но при единичных сигналах в исходном состоянии элемента. Она часто применяется на практике.

В качестве реагирующего органа используются операционные усилители. Питание операционных усилителей, применяемых при изготовлении реле защиты, осуществляется от двух разнополярных источников напряжения постоянного тока с общей нулевой точкой. Значения питающих напряжений берутся в диапазоне от ±5 до ± 15 В в зависимости от конструкции ОУ. Операционный усилитель имеет два независимых входа и один общий выход. Он является усилителем дифференциального типа и реагирует на знак напряжения, определяемого разностью двух напряжений, поданных на его входы. Тот из входов, при преобладании напряжения на котором знак выходного напряжения совпадает с поданным на этот вход, называется неинвертирующим, или сокращенно Н-входом. До последнего времени этот вход обозначался на схемах усилителей условным знаком плюс. Другой вход, преобладание напряжения на котором приводит к изменению знака выходного напряжения на противоположный по сравнению со знаком напряжения на этом же входе, называется инвертирующим, или сокращенно И-входом. Ему присваивался условный знак минус.



а)старое; б)допускаемое; в) новое.

Рисунок 6.6- Условные изображения операционных усилителей

Все типы реле, изображаются с помощью структурных схем, в которых каждое звено (функциональный элемент) представлено своим условным изображением. Условное изображение отдельного звена, выполненного на ОУ, представляет собой вытянутый вверх прямоугольник, внутри которого помещен знак, отображающий свойства этого звена.

7 Лекция №7. Реле защиты, выполненные на операционных усилителях, и интегральных микросхемах

Содержание лекции: приведены сведения о принципах исполнения и реле тока и напряжения выполненных на операционных усилителях.

Цель лекции: изучить назначение основных узлов реле, выполненных на операционных усилителях.

У реле защиты, содержащих операционные усилители, имеется ряд узлов, которыми не располагают электромеханические реле.

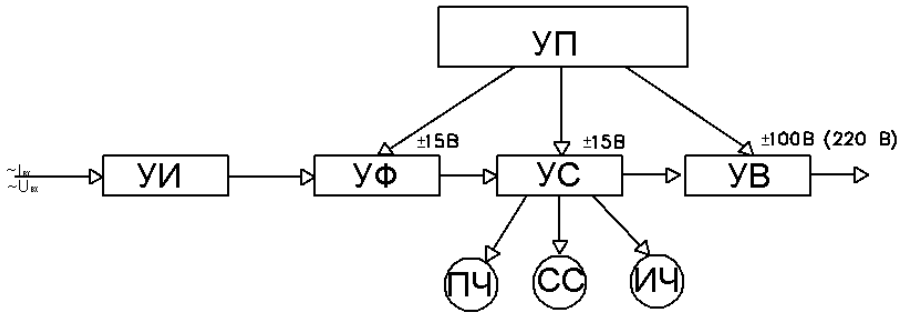
Обобщенная структурная схема реле защиты, в котором применены ОУ, показана на рисунке 7.1. У таких реле имеется пять основных узлов.

узел измерения (УИ), содержащий измерительные преобразователи или датчики тока и напряжения, подаваемых на реле от измерительных трансформаторов тока и напряжения защищаемого объекта.

Узел формирования (УФ**),** в котором получают из поступающих входных сигналов специально сформированные напряжения переменного или выпрямленного тока, требуемые для реализации характеристики реле после их сопоставления в узле сравнения.

Узел сравнения (УС)**,** служащий для дальнейшего преобразования сравниваемых напряжений в форму, удобную для сравнения, собственно сравнения и получения на выходе узла управляющего сигнала, когда результат сравнения свидетельствует о соответствии поданных на реле токов и напряжений условиям его срабатывания.

Узел выхода (УВ) обеспечивает действие содержащегося в нем электромеханического реле при поступлении управляющего сигнала из узла сравнения.



УП — узел питания; УИ - узел измерения; УФ - узел формирования; УС -узел сравнения (ПЧ - преобразующая часть, СС - схема сравнения, ИЧ - исполнительнаячасть); УВ — узел выхода.

Рисунок 7.1 - Структурная схема статического реле зашиты

Узел питания (УП) предназначен для получения от источника оперативного тока защищаемого объекта стабилизированных напряжений постоянного тока, требующихся для работы интегральных микросхем и исполнительного выходного реле. Для каждого типа реле указывается, к какому источнику оперативного тока оно должно подключаться.

Содержащиеся в УИ измерительные преобразователи (датчики) представляют собой промежуточные трансформаторы или трансреакторы, предназначенные для отделения полупроводниковой части реле от вторичных цепей защищаемого объекта. Одновременно эти преобразователи служат для трансформации токов и напряжений. Уровень трансформированных сигналов выбирается по условиям управления операционными усилителями.

Число датчиков определяется схемой реле. В токовых реле применяют один или несколько датчиков тока, а в реле напряжения — соответствующее число датчиков напряжения.

В реле сопротивления и в реле направления мощности устанавливают как датчики тока, так и датчики напряжения.

Остановимся более подробно на исполнении узлов формирования и узлов сравнения, в которых наиболее широко применяются ОУ. В УФ производится обработка сигналов, поступающих из датчиков тока и напряжения. Узел сравнения может быть представлен состоящим из трех частей. В преобразующей части узла сравнения осуществляется превращение поступающих из узла формирования синусоидальных или выпрямленных сигналов в импульсы определенной формы, наиболее удобной для выполнения операции сравнения. Чаще всего используются импульсы прямоугольной формы заданной длительности. В ряде типов реле в этой части *УС* производится сопоставление полученных импульсов между собой или с заранее подготовленным сигналом установленного уровня или продолжительности. В качестве сигнала заданного уровня чаще всего используется напряжение постоянного тока стабильного значения, названное опорным $U_{оп}$.

Другой составной частью узла сравнения является схема сравнения СС, в которой сравниваемые импульсы сопоставляются между собой не только по значению, но и по длительности их возникновения. Схемы сравнения, в которых происходит сравнение входных сигналов с опорным напряжением, применяются в основном в реле тока и в реле напряжения общего назначения.
В конце узла сравнения имеется исполнительная часть ИЧ, в которой создается командный сигнал, если результат сравнения показывает, что параметры токов и напряжений, поступающих в реле, соответствуют условиям его срабатывания. Обычно она представляет собой усилитель с положительной обратной связью, обеспечивающей «релейный» эффект при действии реле.

Узлы сравнения,используемые в серийных реле зашиты, имеют несколько вариантов исполнения. Одним из них является узел сравнения, применяемый в большинстве серийных реле тока и напряжения, реагирующих

на полные значения измеряемых электрических величин. Этот узел работает на время импульсном принципе (рисунок 7.2, а). Для срабатывания таких реле требуется, чтобы, во-первых, входной сигнал превысил некоторое заданное значение, и, во-вторых, обеспечивалось бы определенное соотношение между временем превышения заданного уровня и временем, когда входной сигнал ниже уровня срабатывания. Эти условия обеспечивают хорошую отстройку реле от помех, возникающих в сети питания реле оперативным током, а также из-за наведенных напряжений от смежных цепей.

В соответствии с принципом работы в схеме рисунка 7.2, *а* содержится два индикатора уровня. Один из них входит в состав преобразующей части узла и представляет собой компаратор, собранный на операционном усилителе А1**.** На не инвертирующий вход А1 через делитель на резисторах R2 и R3 - R13 подается от источника оперативного тока положительное опорное напряжение $U_{оп1}$**,** значение которого определяется заданной уставкой реле. На инвертирующий вход А1 подается выпрямленное напряжение, пропорциональное току, поступающему от соответствующего датчика через диодный мост. Если значение поступающего выпрямленного напряжения меньше опорного напряжения, на выходе А1 будет иметься напряжение положительного знака максимального значения, равное примерно 13 В. На временной диаграмме (рисунок 7.2, б), характеризующей работу узла при различных значениях входного сигнала, это соответствует первому полупериоду изменения входного сигнала. Имеющееся на выходе А1 положительное напряжение заряжает конденсатор С1 через резистор R3, так как диод VD2 закрыт. Максимум напряжения на конденсаторе ограничивается напряжением стабилизации VD3, которое равно примерно 9 В. Полученное напряжение подается на другой индикатор уровня, собранный на операционном усилителе А2. Он представляет собой инвертирующий триггер Шмитта. Положительное напряжение, поступающее с конденсатора С1 на инвертирующий вход А2,создает на выходе ОУ напряжение отрицательного знака, достигающее минус 13 В. Через цепь положительной обратной связи на неинвертирующий вход А2 приходит часть этого напряжения, зависящая от соотношения между сопротивлениями резисторов R_6 и R_7**.** Она служит опорным напряжением срабатывания определяющим второе условие срабатывания реле. При возрастании входного напряжения до значения, превышающего опорное, происходит изменение режима компаратора, и знак выходного напряжения А1 становится отрицательным, оставаясь равным максимуму, т.е. минус 13 В. Изменение знака напряжения на выходе А1 вызывает перезаряд конденсатора С1. Если уровень $U_{вх}$ становится выше $U_{оп1}$ на небольшой промежуток времени, как получается во втором и третьем полупериодах изменения $U_{вх}$ на рисунке 7.2, б, то емкость С1 не успевает полностью перезарядиться. Происходит лишь снижение напряжения на емкости С1 до значения, близкого к нулю, а затем после спадания $U_{вх}$ ниже $U_{оп1}$- повторный заряд емкости до максимального положительного уровня. Исполнительная часть узла сравнения подействует

только тогда, когда за счет увеличения входного сигнала время превышения $U_{вх}$ над $U_{оп1}$ равное промежутку $a_{ср}$ на рисунке 7.2, б, станет достаточным, чтобы емкость С1 перезарядилась настолько, что отрицательное напряжение на конденсаторе *С1* стало ниже, $U_{оп2,}$с - Потенциал инвертирующего входа А2 достигнет в этом случае такого значения, что произойдет немедленное изменение знака выходного напряжения триггера на положительный. Это является признаком срабатывания узла. Процесс срабатывания виден на рисунке 7.2, б на четвертом полупериоде, соответствующем началу срабатывания, и двух следующих полупериодах изменения $U_{вх}$, После изменения знака напряжения на выходе А2 напряжение на его не инвертирующем входе А2 становится тоже положительным. Его называют опорным напряжением возврата $U_{оп2,в}$ так как им определяется значение входного сигнала, которое требуется для возврата триггера Шмитта. По окончании промежутка времени, соответствующего $a_{ср}$, емкость С1 снова начнет заряжаться.

Постоянные времени заряда и разряда емкости С1 благодаря наличию диода VD2 получаются неодинаковыми, так как сопротивление цепи заряда примерно в 3 раза больше сопротивления цепи разряда. Поэтому, когда емкость С1 снова начнет заряжаться, она не успеет достичь уровня $U_{оп\ 2}$, как снова наступит разряд. Этим достигается релейное действие реагирующего органа.

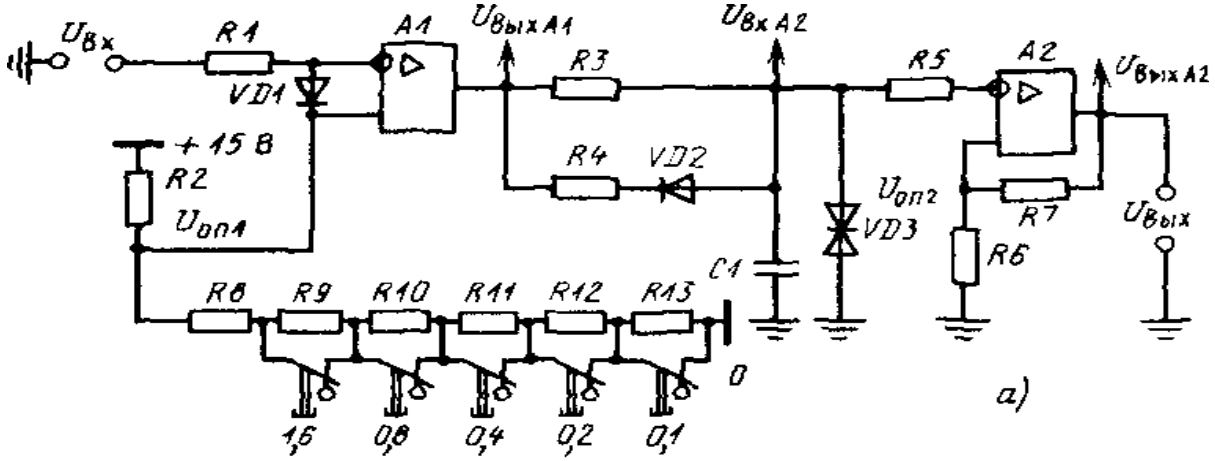


Рисунок 7.2 - Узел сравнения реле тока и напряжения. Принципиальная схема

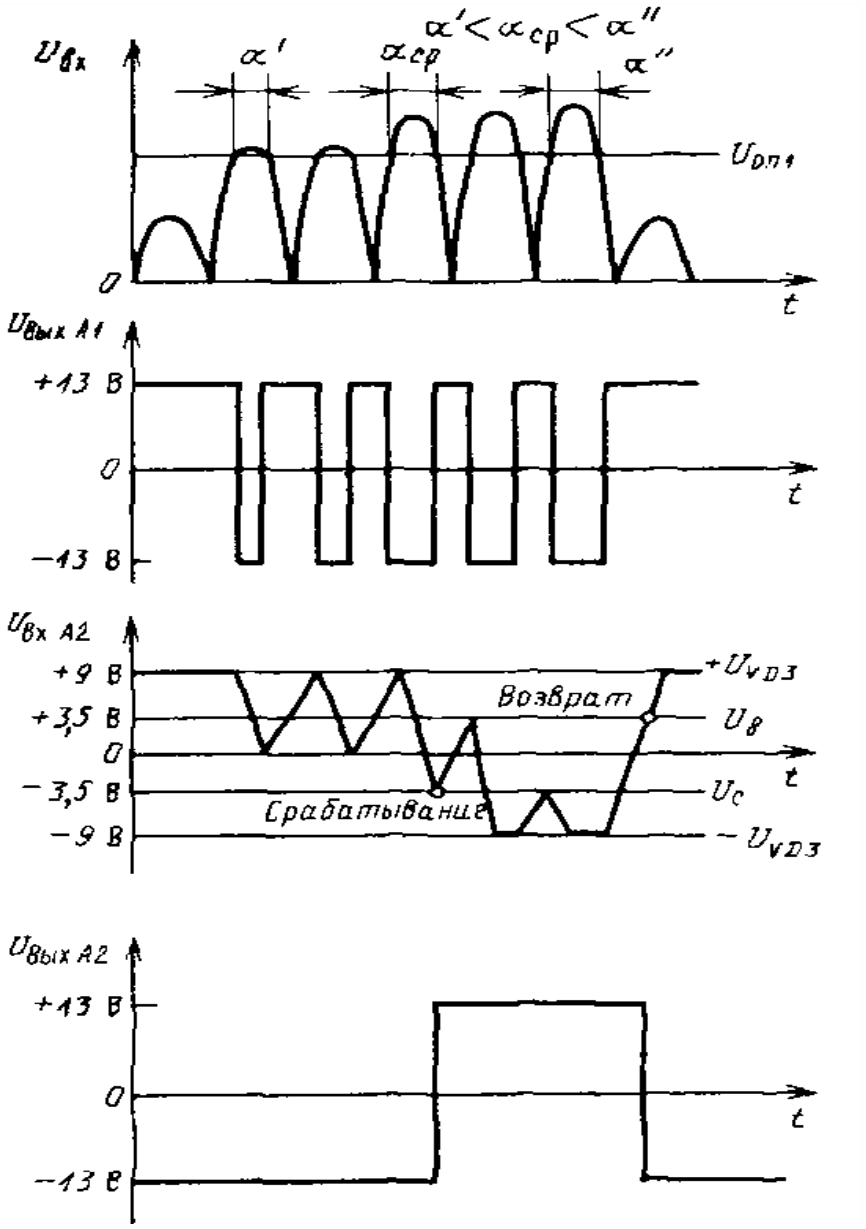


Рисунок 7.3 - Временные диаграммы узла сравнения реле тока и реле напряжения

Статические реле максимального тока серий РСТ 11— РСТ 14 предназначены для использования в качестве измерительных органов токовых защит как мгновенного действия, так и работающих с выдержкой времени любых присоединений электроустановок. Для питания реле этих серий оперативным током должны использоваться надежные источники постоянного или переменного тока напряжением 220 В.

В условном обозначении реле, приводимом в заводской информации, первым указывается номер серии реле. Рядом с ним располагается двухзначное число, обозначающее максимальную уставку по току реле данного типо исполнения. Имеется семь вариантов типовых исполнений, записываемых следующими числами: 04 на ток 0,2 А, 09—0,6 А. 14 - 2 А, 19 -

6 А, 24 - 20 А, 29 — 60 А и 32 - 120 А. Третий знак условного обозначения — цифры 1 или 5. Цифра 1 показывает, что реле собрано на заводе для переднего подключения соединительных проводов, а цифра 5 — соответственно для заднего подключения проводов. В конце условного обозначения приводится вид климатического исполнения реле: УХЛ4 для умеренного климата и 04 — для тропических условий.

Нормальная работа реле в зоне умеренного климата гарантируется в диапазоне температур окружающей среды от —20 до +55 °С и относительной влажности воздуха не более 80 % при 25 °С.

Например, условное обозначение РСТ 13-19-1-УХЛ4 относится к реле максимального тока, предназначенному для использования в сетях с промышленной частотой 50 Гц на объектах с постоянным оперативным током 220 В, наибольшая уставка реле по току - 6 А, подсоединение внешних проводов — переднее, а само реле должно работать в условиях умеренного климата.

Коэффициент возврата реле РСТ 11, РСТ 13 на любой уставке не менее 0,9, что значительно выше, чем у электромеханических максимальных реле тока.

Реле РСТ имеет один замыкающий и один размыкающий контакты. Коммутационная способность контактов в цепи постоянного тока составляет 30 Вт, в цепи переменного тока 250 В - А при напряжении не более 250 В и токе не более 1 А (постоянного) и 2 А (переменного).

Уставки (токи срабатывания реле) выставляются дискретно с помощью пяти переключателей, имеющихся на лицевой плате (рисунок 7.3), в соответствии с формулой

$$I_{ср} = I_{min}(1+ \sum N), \qquad (7.1)$$

где I_{min}— минимальная уставка для соответствующего типа реле;

$\sum N$ — сумма чисел, определяемая положением переключателей на лицевой плате реле (шкале уставок).

При этом в выражении (7.1) учитываются цифры только возле тех переключателей, которые находятся в выступающемположении, а шлиц под отвертку на их головках расположен горизонтально.

Например, для реле типа РСТ 11-24 с I_{min} = 5 А минимальное значение тока срабатывания $I_{ср}$ = 5 А, если ни один из переключателей не выступает и у всех шлицы на головках находятся в вертикальном положении (рисунок 7.3,а). Максимальное значение тока срабатывания для этого типа реле может быть установлено при переводе всех переключателей в выступающее положение, при котором шлицы на головках находятся в горизонтальном положении:

$$I_{ср} = 5(1 +0,1 +0,2 + + 0,4 + 0,8 + 1,6) = 5 \text{ x } 4,1 = 20,5 \text{ А}.$$

Любое промежуточное значение тока срабатывания реле устанавливается путем различных сочетаний положений переключателей. На рисунке 7.3, в установлен ток I ср = 5(1 +0,2+0,8) = 10 А.

Количество и наименование переводимых переключателей реле типа РСТ 11 может быть определено по выражению, полученному из формулы (7.1)

$$\sum N_p = \frac{I_{cp}}{I_{\min}} - 1. \qquad (7.2)$$

Например, при необходимости выставления тока срабатывания на реле РСТ 11-24 I ср = 10 А получим по выражению (7.2)

$$\sum N_p = \frac{10}{I5} - 1 = 1.$$

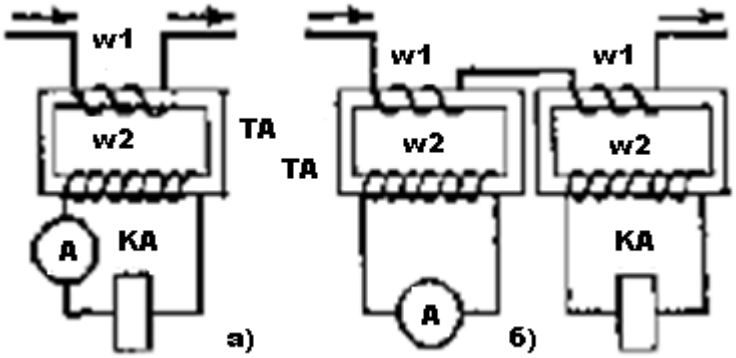
8 Лекция №8. Трансформаторы тока

Содержание лекции: назначение трансформаторов тока. Понятие погрешности ТТ, схемы их включения.

Цель лекции: изучить основные схемы подключения трансформаторов тока, классы точности.

Трансформаторы тока (ТТ) служат для разделения (изоляции) первичных и вторичных цепей, а так же для приведения величины тока к уровню удобному для измерения (стандартный номинальный ток вторичной обмотки 1 А или 5 А).

Устройство и схема включения ТТ показаны на рисунке 8.1. ТТ состоит из стального сердечника С и двух обмоток: первичной (с числом витков w_1) и вторичной (с числом витков w_2). Часто ТТ изготовляются с двумя и более сердечниками. В таких конструкциях первичная обмотка является общей для всех сердечников (рисунке 8.1).



а) с одним сердечником, б) с двумя сердечниками.
Рисунок 8.1- Устройство и схемавключения трансформаторов тока

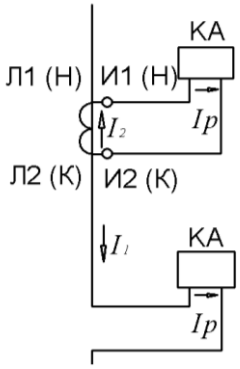


Рисунок 8.2- Маркировка (обозначение) выводов обмоток трансформаторов тока

Первичная обмотка, выполняемая толстым проводом, имеет несколько витков и включается последовательно в цепь того элемента, в котором производится измерение тока, или защита которого осуществляется. К вторичной обмотке, выполняемой проводом меньшего сечения и имеющей большое число витков, подключаются последовательно соединенные реле и приборы.

Ток, проходящий по первичной обмотке ТТ, называется первичным и обозначается I_1, а ток во вторичной обмотке называется вторичным и обозначается I_2. Ток I_1 создает в сердечнике ТТ магнитный поток Φ_1, который, пересекая витки вторичной обмотки, индуктирует в ней вторичный ток I_2, также создающий в сердечнике магнитный поток Φ_2, но направленный противоположно магнитному потоку Φ_1. Результирующий магнитный поток в сердечнике равен разности:

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2. \qquad (8.1)$$

Магнитный поток зависит не только от значения создающего его тока, но и от количества витков обмотки, по которой этот ток проходит. Произведение тока на число витков называется магнитодвижущей силой и выражается в ампервитках (А•вит.). Поэтому, выражение (8.1) можно заменить выражением:

$$F_0 = F_1 – F_2 \qquad (8.2)$$

или

$$I_0w_1 = I_1w_1 – I_2w_2, \qquad (8.3)$$

где I_0- ток намагничивания, являющийся частью первичного тока, обеспечивает результирующий магнитный поток в сердечнике (в дальнейшем обозначается $I_{нам}$);

W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Поскольку при значениях первичного тока, близких к номинальному, ток намагничивания не превышает 0,5—3% номинального тока, то в этих условиях можно с некоторым приближением считать $I_0 = 0$. Тогда из выражения (8.3) следует:

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1. \qquad (8.4)$$

Отношение витков $w_2 / w_1 = K_B$ называется витковым коэффициентом трансформации ТТ.

$$I_1 / I_2 = K_I. \qquad (8.5)$$

Согласно действующему стандарту, отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току называется номинальным коэффициентом трансформации. Номинальные коэффициенты трансформации указываются на щитках ТТ, а также на схемах в виде дроби, в числителе которой – номинальный первичный ток, а в знаменателе – номинальный вторичный ток, например: 600/5 или 1000/1. Определение вторичного тока по известному первичному и, наоборот, производится по номинальным коэффициентам трансформации в соответствии с формулами:

$$I_2 = I_1/K_1; I_1 = I_2K_1. \qquad (8.6)$$

Для правильного соединения ТТ между собой и правильного подключения к ним реле направления мощности, ваттметров и счетчиков, выводы обмоток ТТ обозначаются (маркируются) заводами-изготовителями следующим образом: начало первичной обмотки – $Л_1$, начало вторичной

обмотки – $И_1$ конец первичной обмотки – $Л_2$, конец вторичной обмотки – $И_2$. При монтаже ТТ они обычно располагаются так, чтобы начала первичных обмоток $Л_1$ были обращены в сторону шин, а концы $Л_2$ – в сторону защищаемого оборудования.

При маркировке обмоток ТТ за начало вторичной обмотки Н: принимается тот ее вывод, из которого ток выходит, если в этот момент в первичной обмотке ток проходит от начала Н к концу К, как показано на рисунке 8.2.

При включении реле КА по этому правилу, ток в реле, как показано на рисунке 8.2, при включении его через ТТ сохраняет то же направление, что и при включении непосредственно в первичную цепь.

В нормальном режиме трансформаторы тока, вторичная обмотка которых замкнута на малое сопротивление токовых обмоток приборов и реле, работают в режиме близком к короткому замыканию.

Из условий безопасности персонала при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками, вторичные обмотки трансформаторов тока должны быть обязательно заземлены.

Заземление вторичных цепей трансформаторов тока выполняется в одной точке и, как правило, на ближайшей к ним клеммой сборке.

Коэффициент трансформации ТТ так же, как у ТН, не является строго постоянной величиной и из-за погрешностей может отличаться от номинального значения. Погрешности ТТ зависят, главным образом, от кратности первичного тока по отношению к номинальному току первичной обмотки и от нагрузки, подключенной к вторичной обмотке. При увеличении нагрузки или тока выше определенных значений погрешность возрастает и ТТ переходит в другой класс точности.

Для измерительных приборов погрешность относится к зоне нагрузочных токов 0,2 – 1,2 $I_{ном}$. Эта погрешность именуется классом точности и может быть равна 0,2; 0,5; 1,0; 3,0. Требования к работе ТТ, питающих защиту, существенно отличаются от требований к ТТ, питающим измерительные приборы. Если ТТ, питающие измерительные приборы, должны работать точно в пределах своего класса при токах нагрузки, близких к их номинальному току, то ТТ, питающие релейную защиту, должны работать с достаточной точностью при прохождении токов КЗ, значительно превышающих номинальный ток ТТ. Для целей защиты выпускаются трансформаторы тока класса Р или Д (для дифференциальных защит) в которых не нормируется погрешность при малых (нагрузочных) токах. В настоящее время выпускаются трансформаторы тока классов 10Р и 5Р, погрешность которых нормируется во всем диапазоне токов.

Правила устройства электроустановок требуют, чтобы ТТ, предназначенные для питания релейной защиты, имели погрешность, как правило, не более 10%. Большая погрешность допускается в отдельных случаях, когда это не приводит к неправильным действиям релейной защиты.

Погрешности возникают вследствие того, что действительный процесс трансформации в ТТ происходит с затратой мощности, которая расходуется на создание в сердечнике магнитного потока, перемагничивание стали сердечника (гистерезис), потери от вихревых токов, нагрев обмоток.

Процесс трансформации тока хорошо иллюстрируется схемой замещения ТТ, приведенной на рисунке 8.3. На этой схеме Z_1 и Z_2 – сопротивления первичной и вторичной обмоток, а $Z_{нам}$ – сопротивление ветви намагничивания, которое характеризует указанные выше потери мощности.

Из схемы замещения видно, что первичный ток I_1 входящий в начало первичной обмотки Н, проходит по ее сопротивлению Z_1 и в точке «а» разветвляется по двум параллельным ветвям. Основная часть тока, являющаяся вторичным током I_2, замыкается через сопротивление вторичной обмотки Z_2 и сопротивление нагрузки $Z_Н$, состоящее из сопротивлений реле, приборов и соединительных проводов.

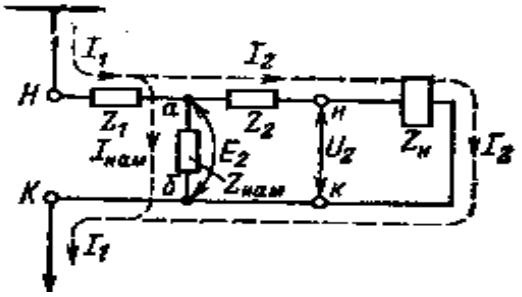


Рисунок 8.3-Схема замещения трансформатора тока

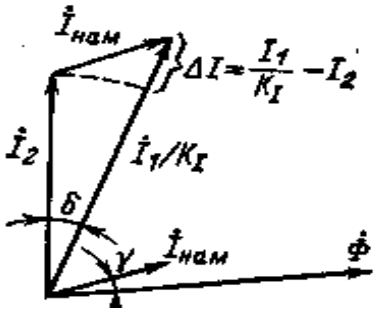


Рисунок 8.4 - Упрощенная векторная диаграмма трансформатора тока

Другая часть первичного тока $I_{нам}$ замыкается через сопротивление ветви намагничивания и, следовательно, в реле, подключенное к вторичной обмотке ТТ, не попадает. Поскольку из всех затрат мощности наибольшая часть приходится на создание магнитного потока в сердечнике, то ветвь между точками а и б схемы замещения ТТ называется ветвью намагничивания и весь ток $I_{нам}$, проходящий по этой ветви, – током намагничивания.

Таким образом, схема замещения показывает, что во вторичную обмотку ТТ поступает не весь трансформированный первичный ток, равный $\boldsymbol{I_1/K_I}$, а его часть, и что, следовательно, процесс трансформации происходит с погрешностями.

На рисунке 8.4 приведена упрощенная векторная диаграмма ТТ, из которой видно, что вектор вторичного тока I_2 меньше значения первичного тока, деленного на коэффициент трансформации $\boldsymbol{K_I}$ на величину ΔI и сдвинут относительно него на угол δ. Таким образом, соотношение значений первичного и вторичного токов в действительности имеет вид:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_{нам}}{K_I}. \qquad (8.7)$$

Различают следующие виды погрешностей ТТ. Токовая погрешность, или погрешность в коэффициенте трансформации, определяется как арифметическая разность первичного тока, поделенного на номинальный коэффициент трансформации $\boldsymbol{I_1/K_I}$, и измеренного (действительного) вторичного тока $\boldsymbol{\dot{I}_2}$ (отрезок ΔI на диаграмме рисунке 8.4):

$$\Delta I = \frac{I_1}{K_I} - I_2. \qquad (8.8)$$

Токовая погрешность, %,

$$f = \frac{\Delta I}{I_1 K_I} 100. \qquad (8.9)$$

Угловая погрешность определяется как угол δ сдвига вектора вторичного тока I_2 относительно вектора первичного тока I_1 (рисунок 8.4) и считается положительной, когда I_2 опережает I_1.

Полная погрешность ($\boldsymbol{\varepsilon}$) определяется как выраженное в процентах отношение действующего значения разности мгновенных значений первичного и вторичного токов к действующему значению первичного тока.

При синусоидальных первичном и вторичном токах: $\boldsymbol{\varepsilon = I_{нам}}$. Из рассмотренного следует, что причиной возникновения погрешностей у трансформаторов тока является прохождение тока намагничивания, т. е. того самого тока, который создает в сердечнике ТТ рабочий магнитный поток, обеспечивающий трансформацию первичного тока во вторичную обмотку. Чем меньше ток намагничивания, тем меньше погрешности ТТ.

Как видно из схемы замещения (рисунок 8.3), ток намагничивания зависит от ЭДС E_2 и сопротивления ветви намагничивания $Z_{нам}$.

Электродвижущая сила E_2 может быть определена как падение напряжения от тока I_2 в сопротивлении вторичной обмотки Z_2 и сопротивлении нагрузки $Z_н$ т. е.:

$$\boldsymbol{E_2 = I_2(Z_2 + Z_н)}. \qquad (8.10)$$

Сопротивление ветви намагничивания $Z_{нам}$ зависит от конструкции трансформаторов тока и качества стали, из которой выполнен сердечник. Это сопротивление не является постоянным, а зависит от характеристики намагничивания стали. При насыщении стали сердечника ТТ, $Z_{нам}$ резко

уменьшается, что приводит к возрастанию $I_{нам}$ и как следствие этого к возрастанию погрешностей ТТ.

Таким образом, условиями, определяющими погрешности трансформаторов тока, являются: отношение, т. е. кратность, первичного тока, проходящего через ТТ, к его номинальному току и нагрузка, подключенная к его вторичной обмотке.

9 Лекция №9. Трансформаторы напряжения

Содержание лекции: назначение трансформаторов напряжения. Понятие погрешности ТН, схемы их включения.

Цель лекции: изучить основные схемы подключения трансформаторов напряжения.

Как и трансформаторы тока, трансформаторы напряжения выполняют две функции: служат для разделения (изоляции) первичных и вторичных цепей, а так же, для приведения величины напряжения к уровню, удобному для измерения (стандартное номинальное напряжение вторичной обмотки: 100/57 В). ТН работают в режиме близком к холостому ходу.

Как показано на рисунке 9.1, трансформатор напряжения TV состоит из стального сердечника (магнитопровода) С, собранного из тонких пластин трансформаторной стали, и двух обмоток – первичной и вторичной, изолированных друг от друга и от сердечника.

Первичная обмотка w_1, имеющая большое число витков (несколько тысяч) тонкого провода, включается непосредственно в сеть высокого напряжения, а к вторичной обмотке w_2, имеющей меньшее количество витков (несколько сотен), параллельно подключаются реле и измерительные приборы. Под воздействием напряжения сети по первичной обмотке проходит ток, создающий в сердечнике переменный магнитный поток Ф, который, пересекая витки вторичной обмотки, индуктирует в ней ЭДС Е, которая при разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход ТН) равна напряжению на ее зажимах U_{2x}.

Напряжение U_{2x} во столько раз меньше первичного напряжения U_1, во сколько раз число витков вторичной обмотки w_2 меньше числа витков первичной обмотки w_1.

$$\frac{U_1}{U_{2x}} = \frac{w_1}{w_2}. \qquad (9.1)$$

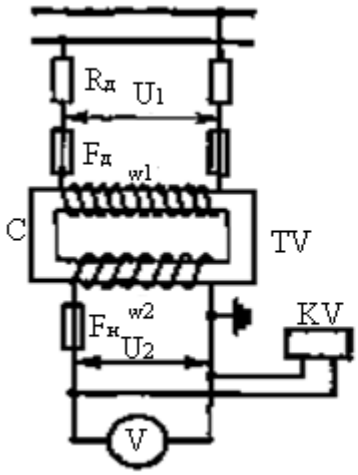


Рисунок 9.1-Устройство и схема включения трансформатора напряжения

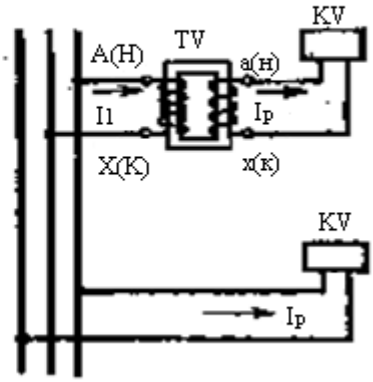


Рисунок 9.2 - Маркировка (обозначение) выводов обмоток трансформатора напряжения

Отношение чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации и обозначается

$$K_U = w_1 / w_2 \ . \tag{9.2}$$

Введя такое обозначение, можно написать:

$$\frac{U_1}{U_{2x}} = K_U \ . \tag{9.3}$$

Если ко вторичной обмотке ТН подключена нагрузка в виде реле и приборов, то напряжение на ее зажимах $\boldsymbol{U_2}$ будет меньше ЭДС на величину падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки. Однако, поскольку это падение напряжения невелико, оно не учитывается и пересчет первичного напряжения на вторичное производится по формулам:

$$\boldsymbol{U_1 = U_1 K_U} \ ; \tag{9.4}$$

$$\boldsymbol{U_2 = \frac{U_1}{K_U}} \ . \tag{9.5}$$

Для правильного соединения между собой вторичных обмоток ТН и правильного подключения к ним реле направления мощности, ваттметров и счетчиков заводы-изготовители обозначают (маркируют) выводные зажимы обмоток определенным образом: начало первичной обмотки – А, конец – Х;

начало основной вторичной обмотки – *a,* конец – *x;* начало дополнительной вторичной обмотки – $a_д$, конец – $x_д$ напряжения с одной вторичной обмоткой.

На рисунках 9.1 и 9.2 приведены основные схемы соединения обмоток однофазных ТН. На рисунке 9.3, *а* дана схема включения одного ТН на междуфазное напряжение. Эта схема применяется, когда для защиты или измерений достаточно одного междуфазного напряжения.

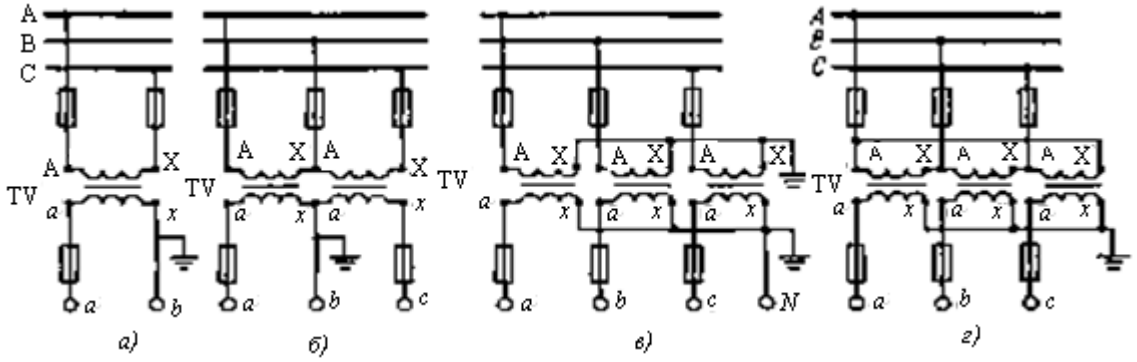


Рисунок 9.3 - Схемы соединения обмоток однофазных трансформаторов Напряжения

На рисунке 9.3, *б* приведена схема соединения двух ТН в открытый треугольник, или в неполную звезду. Эта схема, получившая широкое распространение, применяется, когда для защиты или измерений нужно иметь два или три междуфазных напряжения.

На рисунке 9.3,*в* приведена схема соединения трех ТН в звезду. Эта схема также получила широкое распространение и применяется, когда для защиты или измерений нужны фазные напряжения или же фазные и междуфазные напряжения одновременно. На рисунке 9.3,*г* приведена схема соединения трех ТН треугольник – звезда. Эта схема обеспечивает повышенное напряжение на вторичной стороне, равное ~ 173 В. Такая схема, в частности, используется для питания электромагнитных корректоров напряжения устройств автоматического регулирования возбуждения генераторов.

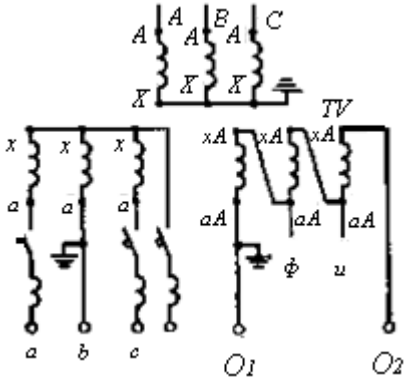


Рисунок 9.4-Схема соединений обмоток трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками

На рисунке 9.4 представлена схема соединения трансформаторов напряжения, имеющих две вторичные обмотки. Первичные и вторичные основные обмотки соединены в звезду, т.е. так же как в рассмотренной выше схеме на рисунке 9.3, *в.* Дополнительные вторичные обмотки соединены в схему разомкнутого треугольника (на сумму фазных напряжений). Такое соединение применяется для получения напряжения нулевой последовательности, необходимого для включения реле напряжения и реле вправления мощности защиты от однофазных КЗ в сети с заземленными нулевыми точками трансформаторов и для сигнализации при однофазных замыканиях на землю в сети с изолированными нулевыми точками трансформаторов. Как известно, сумма трех фазных напряжении в нормальномрежиме, а также при двух-трехфазных КЗ равна нулю. Поэтому в указанных условиях напряжение между точками O_1—O_2 на рисунке 9.4 равно нулю (практически между этими точками имеется небольшое напряжение: 0,5–2 В, которое называется напряжением небаланса). При однофазном КЗ в сети с заземленными нулевыми точками трансформаторов (сети 110 кВ и выше) фазное напряжение поврежденной фазы становится равным нулю, а геометрическая сумма фазных напряжений двух неповрежденных фаз оказывается равном фазному напряжению.

В сети с изолированными нулевыми точками трансформаторов (сети 35 кВ и ниже) при однофазных замыканиях на землю напряжения неповрежденных фаз относительно земли становятся равными междуфазному напряжению, а их геометрическая сумма оказывается равной утроенному фазному напряжению. Для того, чтобы в последнем случае напряжение на реле не превосходило номинального значения, равного 100 В, у ТН, предназначенных для сетей, работающих с изолированными нулевыми точками трансформаторов, вторичные дополнительные обмотки, соединяемые в схему разомкнутого треугольника, имеют увеличенные в 3 раза коэффициент трансформации, например 6000/100/3.

Заземление первичных обмоток необходимо для того, чтобы при однофазных КЗ или замыканиях на землю в сети, где установлен ТН, реле и приборы, включенные на его вторичную обмотку, правильно измеряли напряжение фаз относительно земли, Вторичные обмотки ТН подлежат обязательному заземлению независимо от схемы их соединений. Это заземление является защитным, обеспечивающим безопасность персонала при попадании высокого напряжения во вторичные цепи. Обычно заземляется нулевая точка звезды (рисунок 9.3, *в* и *г)* или один из фазных проводом (рисунок 9.3,*а* и *б*). В проводах, соединяющих точку заземлении с обмотками ТН, не должно быть коммутационных и защитных аппаратов (рубильников) переключателей, автоматических выключателей, предохранителей и т. д.). Сечение заземляющего провода должно быть не менее 4 мм^2 (по меди).

10 Лекция №10. Принцип действия токовых защит. Максимальная токовая защита ЛЭП. Токовые отсечки. Схемы токовых отсечек

Содержание лекции: назначение токовых защит. Максимальная токовая защита ЛЭП. Токовые отсечки. Схемы токовых отсечек.

Цель лекции: изучить основные схемы максимальных токовых защит и их разновидность- токовой отсечки.

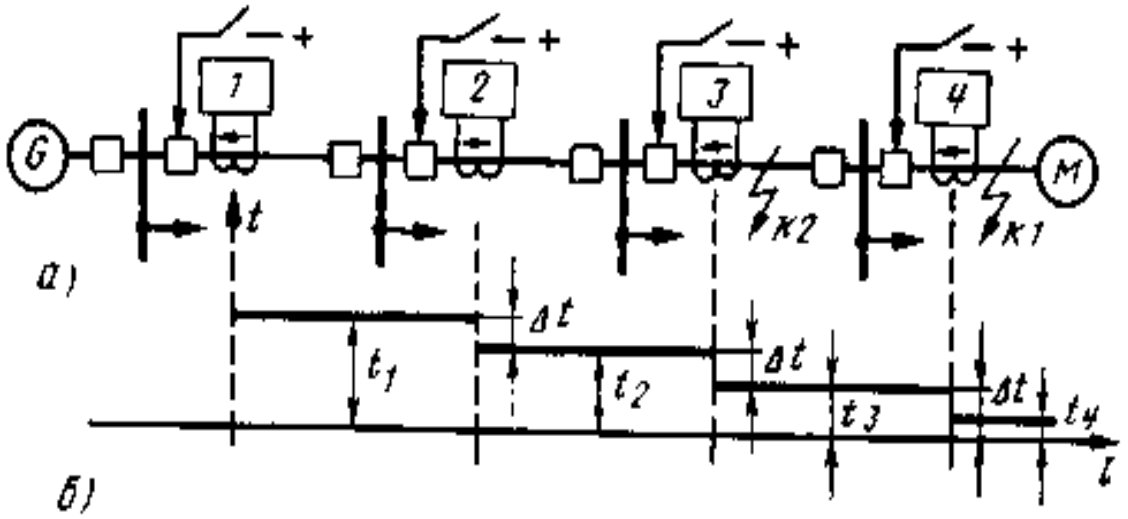
Одним из признаков возникновения КЗ является увеличение тока в ЛЭП. Этот признак используется для выполнения РЗ, называемых токовыми. Токовые РЗ приходят в действие при увеличении тока в фазах ЛЭП сверх определенного значения. В качестве реле, реагирующих на возрастание тока, служат максимальные токовые реле.

Токовые РЗ подразделяются на максимальные токовые РЗ и токовые отсечки. Главное различие между этими РЗ заключается в способе обеспечения селективности. Селективность действия максимальных токовых РЗ достигается с помощью выдержки времени. Селективность токовых отсечек обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.

10.1 Максимальная токовая защита. Принцип действия и селективности защиты

Максимальные токовые защиты (МТЗ) являются основным видом РЗ для сетей с односторонним питанием. Они устанавливаются в начале каждой ЛЭП со стороны источника питания (рисунок 10.1, а). Каждая ЛЭП имеет самостоятельную РЗ, отключающую ЛЭП в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее ПС, и резервирующую РЗ соседней ЛЭП.

При КЗ в какой-либо точке сети, например, в точке К1 (рисунок 10.1, а), ток КЗ проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания и местом повреждения, в результате чего приходят в действие все РЗ (1, 2, 3, 4). Однако по условию селективности сработать на отключение должна только РЗ 4, установленная на поврежденной ЛЭП. Для обеспечения указанной селективности МТЗ выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания, как это показано на рисунке 10.1, б. При соблюдении этого принципа в случае КЗ в точке К1 раньше других сработает МТЗ 4 и отключит поврежденную ЛЭП. Защиты 1, 2 и 3, имеющие большие выдержки времени, вернутся в начальное положение, не успев подействовать на отключение. Соответственно, при КЗ в точке К2 быстрее всех сработает МТЗ 3, а МТЗ 1 и 2, имеющие большее время, не успеют подействовать.

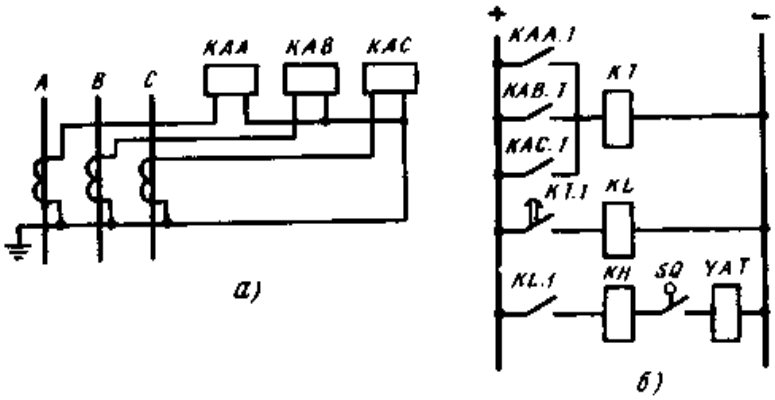


а) размещение МТЗ; б) выдержки времени МТЗ, выбранные по ступенчатому принципу.

Рисунок 10.1- Максимальные токовые РЗ в радиальной сети

На рисунке 10.2 приведена трехфазная схема МТЗ, выполненная на электромеханических реле, которые пока еще преобладают в электрических сетях нашей страны. Три измерительных органа (рисунок 10.2, а) выполняются с помощью трех реле РТ-40, орган времени - с помощью реле типа РВ-100, исполнительный элемент - посредством промежуточного реле, контакты которого рассчитаны на ток электромагнита отключения выключателя. Из рассмотрения схемы понятно, что эта защита действует при всех видах КЗ.

Контакты реле КА соединяются по схеме ИЛИ. Питание оперативных цепей защиты осуществляется постоянным током с шин управления (ШУ) через свои предохранители, а электромагнит отключения ЭО от других предохранителей. Трехфазные схемы обычно применяются в сетях с глухозаземленными нейтралями.



а) токовые цепи; б) оперативные цепи защиты с независимой выдержкой времени.

Рисунок 10.2 - Принципиальная схема трехфазной МТЗ

Выбор тока срабатывания**.** Исходным для выбора тока срабатывания МТЗ является требование, чтобы она надежно работала при повреждениях на защищаемом участке, но в то же время не действовала при максимальном рабочем токе нагрузки $I_{н\ max}$ и кратковременных перегрузках, вызванных пуском и самозапуском электродвигателей гл., а также нарушением нормального режима электрической сети.

Для отстройки МТЗ от $I_{н\ max}$ необходимо выполнить два условия. По первому условию МТЗ, пришедшая в действие при КЗ в сети (вне защищаемой ЛЭП), должна надежно возвращаться в исходное состояние после отключения КЗ при наличии в защищаемой ЛЭП тока нагрузки $I_{н\ та}$.

-по первому условию:

$$I_{с.з} = (k_{отс}/ k_{в})\ k_{сэп} I_{р}; \qquad (10.1)$$

-по второму условию ИО тока, находящиеся в состоянии не действия МТЗ, не должны срабатывать при появлении $I_{нmax}$:

$$I_{с.з} > I_{н\ max}. \qquad (10.2)$$

10.2 Токовые отсечки. Принцип действия токовых отсечек

Отсечка является разновидностью МТЗ, позволяющей обеспечить быстрое отключение КЗ. Токовые отсечки подразделяются на отсечки мгновенного действия и отсечки с выдержкой времени.

Селективность токовых отсечек достигается ограничением их зоныдействия так, чтобы отсечка не работала при КЗ за пределами этой зоны, на смежных участках сети, РЗ которых имеет выдержку времени,

равную или большую, чем отсечка. Для этого ток срабатывания отсечки ($I_{с.з}$) должен быть больше максимального тока КЗ ($I_{кmax}$), проходящего через нее при повреждении в конце участка (например, *АМ* на рисунке 10.3, за пределами которого она не должна работать: $I_{с.э}>I_{кМ}$).

Зона действия мгновенной отсечки по условиям селективности не должна выходить за пределы защищаемой ЛЭП. Зона действия отсечки, работающей с выдержкой времени, выходит за пределы защищаемой ЛЭП и по условию селективности должна отстраиваться от конца зоны РЗ смежного участка по току и по времени. Токовые отсечки применяются как в радиальной сети с односторонним питанием, так и в сети, имеющей двустороннее питание.

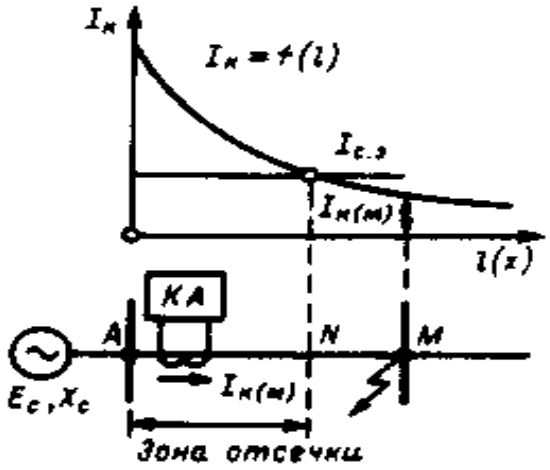


Рисунок 10.3- Принцип действия токовой отсечки

Схемы цепей постоянного тока отсечек изображены на рисунке 10.4, *а, б.* Схемы отсечек, выполненные на электромеханических реле и на постоянном оперативном токе, аналогичны схемам МТЗ.

Схемы отсечек с выдержкой времени полностью совпадают со схемами МТЗ с независимой выдержкой времени. Схемы отсечек без выдержки времени отличаются от схем МТЗ отсутствием реле времени.

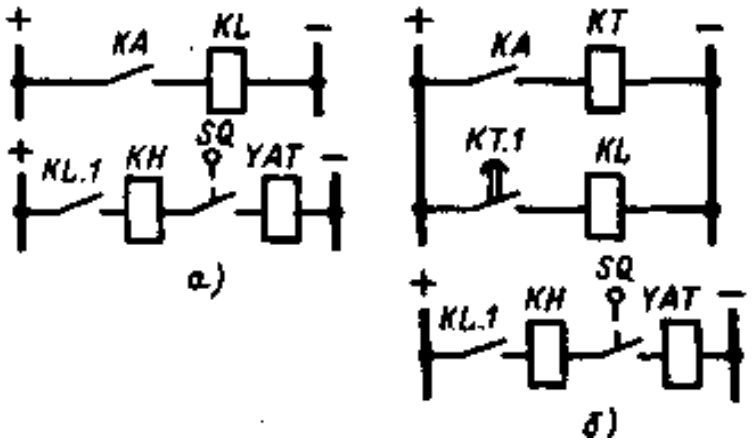


Рисунок 10.4 - Схемы цепей постоянного тока токовой отсечки на электромеханических реле

11 Лекция № 11. Продольная дифференциальная защита линий

Содержание лекции: рассмотрены схемы продольной защиты линий, принцип её действия.

Цель лекции: изучить принцип действия продольной защиты линий, обладающей абсолютной селективностью, причины возникновения тока небаланса, особенности защиты.

Для отключения КЗ в пределах всей защищаемой ЛЭП без выдержки времени служат дифференциальные РЗ, которые подразделяются на продольные и поперечные.

Принцип действия продольных дифференциальных РЗ основан на сравнении значения и фазы токов в начале и конце защищаемой ЛЭП. Как видно из рисунка 11.1, а, при внешнем КЗ (в точке *К)* токи I_I и I_{II} на концах ЛЭП АВ направлены в одну сторону и равны по значению, а при КЗ на защищаемой ЛЭП (рисунок 11.1, б) они направлены в разные стороны и, как правило, не равны друг другу. Следовательно, сопоставляя значение и фазу токов $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$, можно определять, где возникло КЗ - на защищаемой ЛЭП или за ее пределами. Такое сравнение токов по значению и фазе осуществляется в реагирующем органе (реле тока). Для этой цели вторичные обмотки ТТ ТАI и ТАII, установленных по концам защищаемой ЛЭП и имеющих одинаковые коэффициенты трансформации, при помощи соединительного кабеля подключаются к дифференциальному реле КА (реагирующему органу) таким образом, чтобы при внешнем КЗ ток в реле был равен разности токов $\underline{I}_{Iв}$ и $\underline{I}_{IIв}$, а при КЗ на ЛЭП их сумме $\underline{I}_{Iв}+ \underline{I}_{IIв}$. Применяется схема дифференциальной РЗ с циркулирующими токами, основанная на сравнении вторичных токов (рисунок 11.1). Реагирующий орган - токовое реле КА включается параллельно вторичным обмоткам ТТ. При таком включении в случае внеш-

него КЗ токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ замыкаются через обмотку КА и проходят по ней в противоположном направлении (рисунок 11.1, а). Ток в реле равен разности токов:

$$I_р = \underline{I}_{Iв} - \underline{I}_{IIв} = \underline{I}_I/K_I - \underline{I}_{II}/K_I. \quad (11.1)$$

При равенстве коэффициентов трансформации и отсутствии погрешностей в работе ТТ вторичные токи $\underline{I}_{Iв} - \underline{I}_{IIв}$, поступающие в обмотку реле, балансируются, ток $I_р = 0$, и реле не срабатывает.

Таким образом, по принципу действия дифференциальная РЗ не реагирует на внешние КЗ, токи нагрузки и качания, поэтому она выполняется без выдержки времени и не должна отстраиваться от токов нагрузки и качаний. В действительности же ТТ работают с погрешностью. Вследствие этого в указанных режимах в реле появляется ток небаланса:

$$I_р = \underline{I}_{нб} = \underline{I}_{Iв} - \underline{I}_{IIв}. \quad (11.2)$$

Для исключения неселективной работы при внешних КЗ $I_{с.з}$ дифференциальной РЗ должен превышать максимальное значение тока небаланса:

$$I_{с.з} > I_{нбmax}. \quad (11.3)$$

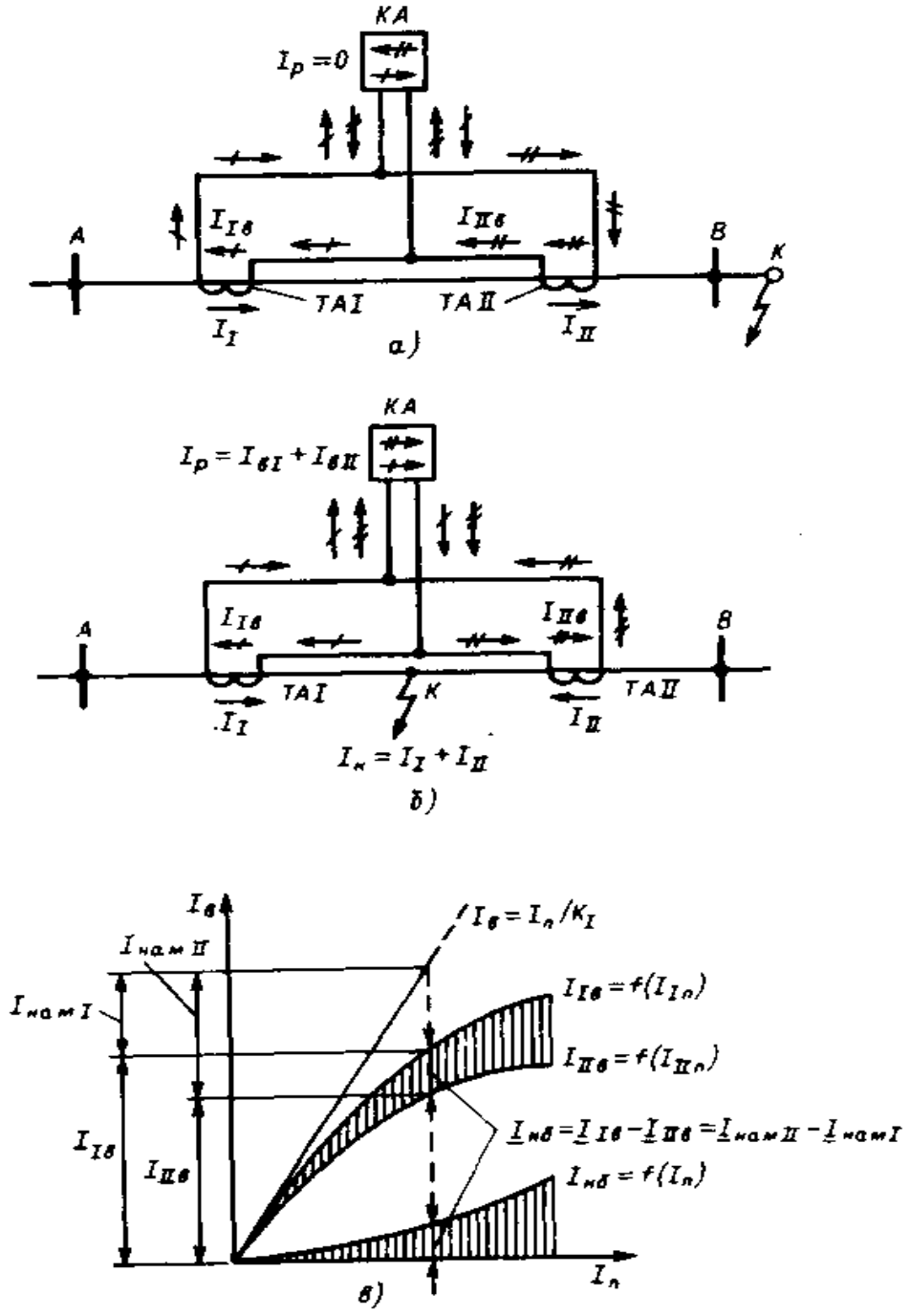


Рисунок11.1 - Токи небаланса в дифференциальной защите

При КЗ на защищаемой ЛЭП (рисунок 11.1, б) первичные токи $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$ направлены от шин подстанций в ЛЭП (к месту КЗ). При этом вторичные токи $\underline{I}_{Iв}$- $\underline{I}_{IIв}$ суммируются в обмотке реле:

$$I_р = I_{Iв} + \underline{I}_{IIв} = \underline{I}_I/K_I + \underline{I}_{II}/K_I = \underline{I}_K/K_I, \qquad (11.4)$$

где $\underline{I}_к$ - полный ток КЗ, равный сумме токов $\underline{I}_I$ и $\underline{I}_{II}$, притекающих к месту повреждения (к точке К).

Под влиянием этого тока РЗ срабатывает. Выражение (11.4) показывает, что дифференциальная РЗ реагирует на полный ток КЗ в месте повреждения, и поэтому в сети с двусторонним питанием она обладает большей чувствительностью, чем токовые РЗ, реагирующие на ток, проходящий только по одному концу ЛЭП. Зона действия РЗ охватывает участок ЛЭП, расположенный между ТТ, к которым подключено токовое реле.

Выразив в (11.2) вторичные токи через первичные, с учетом погрешности ТТ получим $I_{нб}$ в реле:

$$I_{нб} = (\underline{I}_I/K_I - \underline{I}_{Iнам}) - (\underline{I}_{II}/K_I - \underline{I}_{II\ нам}), \qquad (11.5)$$

где $\underline{I}_{Iнам}$ и $\underline{I}_{II\ нам}$ - токи намагничивания, отнесенные ко вторичным обмоткам ТТ (ТАI и ТАII).

Так как при внешнем КЗ, сквозных токах нагрузки и качаний первичные токи в начале и конце ЛЭП одинаковы, $\underline{I}_I = \underline{I}_{II}$, (из 11.5) получим

$$I_{нб} = \underline{I}_{II\ нам} - \underline{I}_{I\ нам}. \qquad (11.6)$$

Это выражение показывает, что значение тока небаланса определяется различием значений токов намагничивания ТТ. Следовательно, для уменьшения тока небаланса необходимо выравнивать токи намагничивания $I_{I\ нам}$ и $I_{II\ нам}$ по значению и фазе.

12 Лекция №12. Защиты трансформаторов и автотрансформаторов

Содержание лекции: рассматриваются резервные и основные защиты трансформаторов и автотрансформаторов.

Цель лекции: изучить основные виды повреждений и ненормальных режимов трансформаторов и способы защиты от них.

Виды повреждений. Основными видами повреждений в трансформаторах и автотрансформаторах являются: замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора (трехфазного) и на наружных выводах обмоток; замыкания в обмотках между витками одной фазы (витковые замыкания); замыкания на землю обмоток или их наружных выводов; повреждения магнитопровода трансформатора, приводящие к появлению местного нагрева и «пожару стали». Опыт показывает, что КЗ на выводах и витковые замыкания в обмотках происходят наиболее часто.

Междуфазные повреждения внутри трансформаторов возникают значительно реже. В трехфазных трансформаторах они хотя и не исключены,

но маловероятны вследствие большой прочности междуфазной изоляции. В трансформаторных группах, составленных из трех однофазных трансформаторов, замыкания между обмотками фаз практически невозможны.

При витковых замыканиях токи, идущие к месту повреждения от источников питания, могут быть небольшими. Чем меньше число замкнувшихся витков w_a, тем меньше будет ток $I_к$, приходящий из сети.

Для ограничения размера разрушения РЗ от повреждений в трансформаторе должна действовать быстро (t= 0,05 ÷ 0,1 с).

Защита от повреждений. В качестве таких РЗ применяются токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты.

На трансформаторах мощностью 200 МВ • А и более предусматривается автоматическое пожаротушение водой. Все изложенное далее, в равной мере относится к трансформаторам и автотрансформаторам.

Виды ненормальных режимов. Наиболее частым ненормальным режимом работы трансформаторов является появление в них сверхтоков, т. е. токов, превышающих номинальный ток обмоток трансформатора. Сверхтоки в трансформаторе возникают при внешних КЗ, качаниях и перегрузках. Последние возникают вследствие самозапуска электродвигателей, увеличения нагрузки в результате отключения параллельно работающего трансформатора, автоматического подключения нагрузки при действии АВР и т. п.

Внешние КЗ. При внешнем КЗ, вызванном повреждением на шинах трансформатора или не отключившимся повреждением на отходящем от шин присоединении, по трансформатору проходят токи КЗ $I_к > I_{ном}$, которые нагревают его обмотки сверх допустимого значения, что может привести к повреждению трансформатора. В связи с этим трансформаторы должны иметь РЗ от внешних КЗ, отключающую трансформатор.

12.1 Резервные защиты трансформаторов и автотрансформаторов

Защитаот внешнихКЗ осуществляется при помощи МТЗ, МТЗ с блокировкой минимального напряжения, дистанционной РЗ, токовых РЗ нулевой и обратной последовательностей. В зону действия РЗ от внешних КЗ должны входить шины подстанций (I участок) и присоединения, отходящие от этих шин (II участок). Эти РЗ являются также резервными от повреждений в трансформаторе.

Перегрузка. Время действия РЗ от перегрузки определяется только нагревом изоляции обмоток. Масляные трансформаторы допускают длительную перегрузку на 5%. В аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка в следующих пределах:

Кратность перегрузки	1,3	1,6	1,75	2	3
Допустимое время перегрузки, мин	120	45	20	10	1,5

Из этих данных видно, что перегрузку порядка (1,5-2) $I_{ном}$ можно допускать в течение значительного времени, измеряемого десятками минут. Наиболее часто возникают кратковременные, самоликвидирующиеся перегрузки, неопасные для трансформатора ввиду их непродолжительности, например, перегрузки, вызванные самозапуском электродвигателей или толчкообразной нагрузкой (электропоезда, подъемники и т. п.). Отключения трансформатора при таких перегрузках не требуется. Более длительные перегрузки, вызванные, например, автоматическим подключением нагрузки от АВР, отключением параллельно работающего трансформатора и др., могут быть ликвидированы обслуживающим персоналом, который располагает для этого достаточным временем. На подстанциях без дежурного персонала ликвидация длительной перегрузки должна производиться автоматически от РЗ отключением менее ответственных потребителей или перегрузившегося трансформатора.

Таким образом, РЗ трансформатора от перегрузки должна действовать на отключение только в том случае, когда перегрузка не может быть устранена персоналом или автоматически.

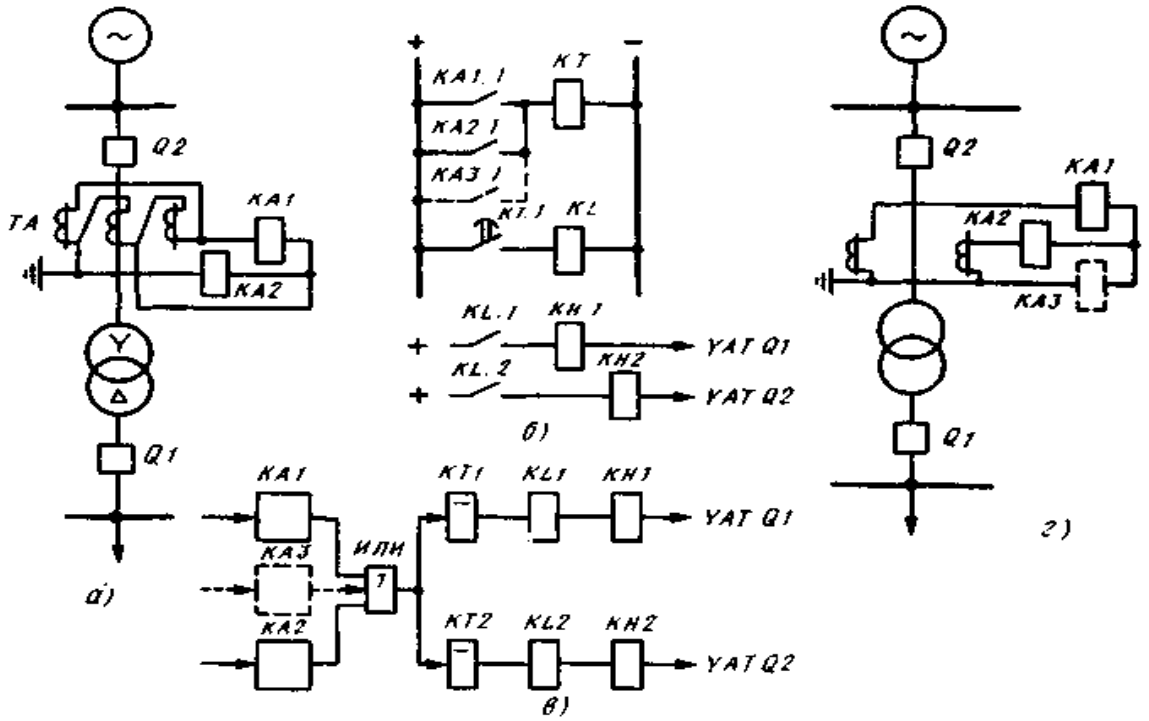
Неполнофазный режим. На автотрансформаторах (АТ) предусматриваются РЗ от неполнофазного режима, возникающего при отключении (или включении) не всеми фазами сторон высшего (ВН) или среднего (СН) напряжений. Эта РЗ должна действовать на отключение АТ. Необходимость установки такой РЗ обусловлена возможностью отключения в указанном режиме второго, параллельно работающего АТ той же подстанции.

Понижение уровня масла в баке трансформатора ниже уровня обмоток, что возможно при течи в баке или резком понижении температуры наружного воздуха, может привести к повреждению обмотки.

Защита от внешних КЗ служит для отключения трансформатора при КЗ на сборных шинах или на отходящих от них присоединениях (рисунок 12.1), если РЗ или выключатели этих элементов отказали в работе. Одновременно РЗ от внешних КЗ используется и для защиты от повреждения в трансформаторе. Однако по условиям селективности РЗ от внешних КЗ должна иметь выдержку времени и, следовательно, не может быть быстродействующей. По этой причине в качестве основной РЗ от повреждений в трансформаторах она используется лишь на маломощных трансформаторах. На трансформаторах, имеющих специальную РЗ от внутренних повреждений, РЗ от внешних КЗ служит резервом к этой защите на случай ее отказа. Наиболее простой РЗ от внешних КЗ является МТЗ. В тех случаях, когда ее чувствительность оказывается недостаточной, применяются более чувствительные МТЗ с пуском по напряжению, МТЗ ОП и НП, ДЗ.

Максимальные токовые защиты трансформаторов. Защита двухобмоточных понижающих трансформаторов. Схема МТЗ трансформатора с односторонним питанием приведена на рисунке 12.1. Чтобы включить в зону действия защиты сам трансформатор, РЗ устанавливается со стороны

источника питания и должна действовать на отключение выключателя Q1. Токовые реле МТЗ включаются на ТТ, установленные у выключателя Q2.



а) схема токовых цепей с тремя ТТ; б) принципиальная схема оперативных цепей; в) структурная схема; г) схема токовых цепей с двумя ТТ.
Рисунок 12.1- Максимальная токовая защита двухобмоточного трансформатора

На рисунке 12.1, а приведена схема РЗ трансформатора, выполненная с двумя токовыми реле КА1 и КА2, которые, сработав, с выдержкой времени одновременно действуют на отключение выключателей Q1 и Q2.

При этом в случае внешних КЗ на стороне низшего напряжения (НН) трансформатора отключение выключателя Q2 резервирует действие выключателя Q1. Часто РЗ выполняют с двумя выдержками времени: с первой t_1 на отключение выключателя Q1 со стороны НН, а со второй $t_2 = t_1 + {}_{\Delta}t$ на отключение Q2 со стороны ВН. Структурная схема при таком выполнении МТЗ приведена на рисунке 12.1, в. В случае не отключенного внешнего КЗ на стороне НН МТЗ с выдержкой времени t_1 отключит выключатель Q1, трансформатор при этом останется под напряжением со стороны ВН. В случае же повреждения в трансформаторе и отказе его основных быстродействующих РЗ МТЗ с выдержкой времени отключит выключатель Q2.

Токовые реле КА1 и КА2 в схеме МТЗ трансформаторов с ВН 110-220 кВ подключены к ТТ, соединенным в треугольник (рисунок 12.1, а). Такое выполнение токовых цепей МТЗ предотвращает возможное неселективное

ее действие при КЗ на землю в сети 110-220 кВ (в случае когда нейтраль трансформатора заземлена). Защита может действовать при всех видах междуфазных КЗ на сторонах как ВН, так и НН трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ. При этом, однако по сравнению с МТЗ, содержащей три токовых реле, подключенных к ТТ, соединенным в полную звезду, имеет место снижение чувствительности на 15% при двухфазном КЗ на стороне НН 6-10 кВ для трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y или Δ/Δи не связанных с сетью с заземленной нейтралью МТЗ выполняется также двумя токовыми реле КА1 и КА2 (рисунок 12.1, г), ТТ при этом соединяются в неполную звезду.

Подобная схема МТЗ может применяться и на трансформаторах со схемой соединения обмоток Y/Δ. При этом для повышения чувствительности МТЗ к двухфазным КЗ за трансформатором, обмотки которого соединены по схеме Y/Δ, устанавливается дополнительное реле в обратном проводе токовых цепей КА3 (показано пунктиром на рисунке 12.1, в-г). Аналогичная схема применяется и на трансформаторах со схемой соединения обмоток треугольник-звезда с заземленной нулевой точкой (обычно питающих сеть 0,4 кВ).

Резервные защиты от внешних междуфазных КЗ на АТ. На трехобмоточных понижающих АТ в качестве резервных защит от внешних междуфазных КЗ применяются: на стороне НН - МТЗ с комбинированным пуском напряжения: на стороне ВН АТ 220/110/6-10-35 кВ - НТЗ и МТЗ ОП, а также МТЗ с пуском по напряжению от трехфазных КЗ; на сторонах ВН и СН АТ 220/110/6-10-35 кВ и 500/220/10 кВ - ДЗ.

Максимальная токовая РЗ с комбинированным пуском напряжения на стороне НН АТ присоединяется к ТТ, встроенным в его выводы. С первой выдержкой времени РЗ должна действовать на отключение выключателя НН, а со второй - на отключение всего АТ.

Токовая РЗ ОП устанавливается на стороне ВН и питается от ТТ, встроенных во втулки ВН АТ. Релейная защита выполняется направленной в сторону ВН в предположении, что выдержки времени резервных РЗ НЭП ВН меньше выдержек времени резервных РЗ ЛЭП СН. Как направленная, РЗ действует с первой выдержкой времени, большей выдержек времени резервных РЗ ЛЭП ВН, на отключение шиносоединительного или секционного выключателей (при их наличии), со второй -на отключение выключателя ВН АТ и с третьей - на выходные промежуточные реле АТ. В обход РНМ, как ненаправленная, РЗ действует с первой выдержкой времени - на отключение шиносоединительного и секционного выключателей СН, со второй - на отключение выключателя СН АТ и с третьей -на выходные промежуточные реле РЗ АТ.

Направленная токовая РЗ ОП выполняется с использованием фильтра-реле тока РТФ-8 и РНМ ОП типа РМОП-2М. При наличии на стороне ВН АТ схемы «мостик» с выключателем в перемычке и

отделителями в цепях АТ РЗ выполняется ненаправленной. В дополнение к МТЗ ОП для действия при трехфазных КЗ предусматривается МТЗ с пуском минимального напряжения в однофазном исполнении.

Направленные ДЗ, устанавливаемые на сторонах ВН и СН, включаются таким образом, чтобы защищать ЛЭП ВН и СН соответственно. Применение ДЗ более сложных, чем МТЗ, объясняется необходимостью обеспечения согласования по селективности РЗ, установленных на противоположных концах ЛЭП, и дальнего резервирования в сетях ВН и СН.

Токовая защита нулевой последовательности реагирует на ток $3I_0$, появляющийся в трансформаторе при внешних КЗ (одно- и двухфазных на землю) и КЗ в трансформаторе. Она применяется на повышающих трансформаторах (а также на АТ) и устанавливается со стороны обмоток ВН и СН, если последние соединены по схеме звезды и работают с глухозаземленной нулевой точкой.

Защита от перегрузки трансформатора - на трансформаторах, находящихся под наблюдением оперативного персонала, РЗ от перегрузки выполняется действующей на сигнал посредством одного токового реле.

12.2 Основные защиты трансформаторов и автотрансформаторов

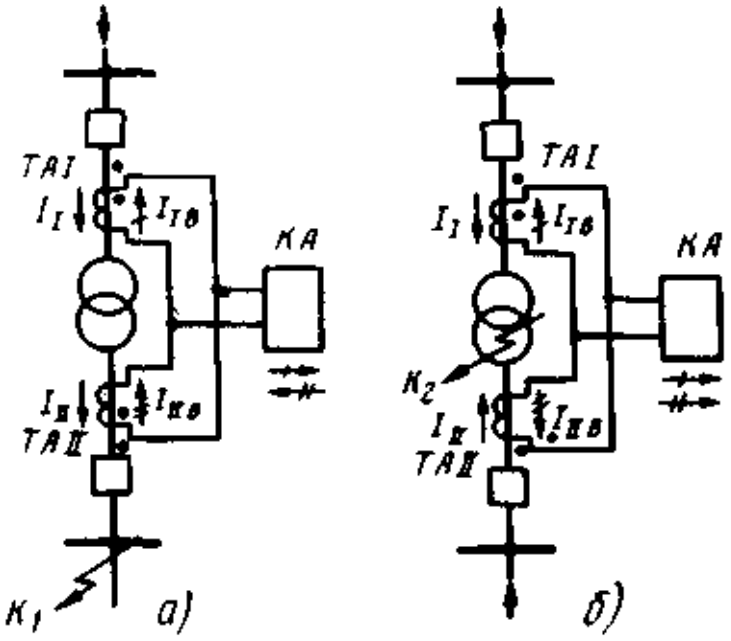
Токовая отсечка - простая быстродействующая РЗ от повреждений в трансформаторе Зона действия отсечки ограничена, она не действует при витковых замыканиях и замыканиях на землю в обмотке, работающей на сеть с малым током замыкания на землю. Отсечка устанавливается с питающей стороны.

В зону действия отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны питания. Отсечка, являющаяся РЗ от внутренних повреждений, должна отключать трансформатор со всех сторон, имеющих источники питания. Достоинством отсечки являются ее простота и быстро - действие. Отсечка в сочетании с МТЗ и газовой защитой (рассматриваемой ниже) обеспечивает хорошую защиту для трансформаторов малой мощности.
В качестве основной быстродействующей РЗ трансформаторов от КЗ между фазами, однофазных КЗ на землю и от замыканий витков одной фазы широкое распространение получила дифференциальная РЗ (рисунок 12.2). При внешнем КЗ и нагрузке токи I_I и I_{II} направлены в одну сторону (рисунок 11.1,а) и находятся в определенном соотношении, равном коэффициенту трансформации защищаемого трансформатора:

$$I_{II}/ I_I = К_т. \qquad (12.1)$$

При внешнем КЗ защита не должна действовать, при КЗ в трансформаторе - должна работать. С учетом этого и выполняется схема

защиты. Трансформаторы тока TAI и TAII, питающие схему, устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора.



а) внешнее КЗ; б) КЗ в трансформаторе.

Рисунок 12.2- Действие дифференциальной защиты трансформатора

Их вторичные обмотки соединяются разноименными полярностями так, чтобы при внешнем КЗ и нагрузке вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ были направлены в контуре соединительных проводов последовательно (циркулировали по ним). Дифференциальное реле КА включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока. При таком соединении в случае внешнего КЗ и при токе нагрузки вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ замыкаются по обмотке реле КА и направлены в ней встречно, поэтому ток в реле равен разности вторичных токов:

$$I_р = \underline{I}_{Iв} - \underline{I}_{IIв.} \qquad (12.2)$$

При КЗ в защищаемом трансформаторе вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ проходят по обмотке реле в одном направлении (рисунок 12.2, б), в результате чего ток в реле равен их сумме:

$$I_р = \underline{I}_{Iв} + \underline{I}_{IIв.} \qquad (12.3)$$

Если $I_р > I_{с.р}$ то реле срабатывает и отключает трансформатор.

Для того, чтобы дифференциальная РЗ не работала при нагрузке и внешних КЗ, необходимо уравновесить вторичные токи в плечах РЗ так, чтобы ток в реле, равный их разности, отсутствовал: '

$$I_Р = \underline{I}_{IВ} - \underline{I}_{IIв} = 0. \qquad (12.4)$$

Для этого необходимо, чтобы токи совпадали по модулю и по фазе, т. е. $\underline{I}_{IВ} = \underline{I}_{IIв}$.

Особенности дифференциальной защиты трансформаторов.

В дифференциальной РЗ ЛЭП и генераторов первичные токи в начале и конце защищаемого участка одинаковы, поэтому для выполнения условия селективности (12.4) достаточно иметь равенство коэффициентов трансформации ТТ. Иное положение имеет место в дифференциальной РЗ трансформаторов. Первичные токи обмоток трансформатора не равны по значению и в общем случае не совпадают по фазе.

В режиме нагрузки и внешнего КЗ ток трансформатора на стороне низшего напряжения I_{II} всегда больше тока на стороне высшего напряжения I_I. Их соотношение определяется коэффициентом трансформации силового трансформатора согласно (12.1).

В трансформаторе с соединением обмоток звезда-треугольник и треугольник-звезда токи I_I и I_{II} различаются не только по значению, но и по фазе. Угол сдвига фаз зависит от группы соединения обмоток трансформатора. При наиболее распространенной, одиннадцатой группе линейный ток на стороне треугольника опережает линейный ток со стороны звезды на 30°. В трансформаторах с соединением обмоток звезда-звезда токи I_I и I_{II} совпадают по фазе. Таким образом, для выполнения условия селективности (11.4) необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов $I_{IВ} = I_I/K_{II}$ и $I_{IIв} = I_{II} / K_{ЛII}$ по значению а при разных схемах соединения обмоток (Y/Δ и Δ/Y) - и по фазе с тем, чтобы поступающие в реле токи были равны. Компенсация сдвига токов $\underline{I}_{IВ}$ и $\underline{I}_{IIв}$ по фазе осуществляется соединением в треугольник вторичных обмоток ТТ, установленных на стороне звезды силового трансформатора. Соединение в треугольник обмоток ТТ должно соответствовать соединению в треугольник обмотки силового трансформатора.

13 Лекция № 13. Газовая защита трансформаторов

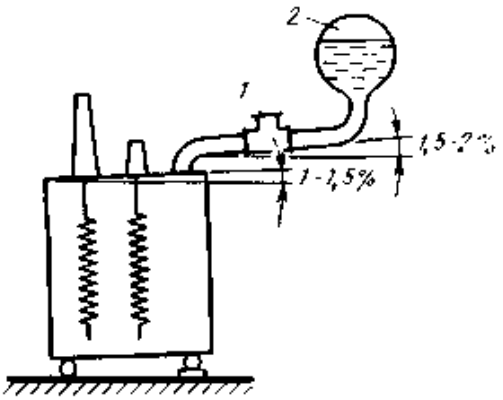
Содержание лекции: приводятся сведения о повреждениях внутри бака трансформатора; принцип действия и конструкцию газового реле.

Цель лекции: изучить защиту трансформатора от внутренних повреждений.

Газовая защита получила широкое распространение в качестве весьма чувствительной защиты от внутренних повреждений трансформаторов.

Повреждения трансформатора, возникающие внутри его кожуха, сопровождаются электрической дугой или нагревом деталей, что приводит к разложению масла и изоляционных материалов и образованию летучих газов. Будучи легче масла, газы поднимаются в расширитель 2, который является самой высокой частью трансформатора (рисунок 13.1) и имеет сообщение с атмосферой. При интенсивном газообразовании, имеющем место при значительных повреждениях, бурно расширяющиеся газы создают сильное давление, под влиянием которого масло в кожухе трансформатора приходит в движение, перемещаясь в сторону расширителя. Таким образом, образование газа в кожухе трансформатора и движение масла в сторону расширителя могут служить признаком повреждения внутри трансформатора.

Эти признаки используются для выполнения специальной защиты при помощи газовых реле, реагирующих на появление газа и движения масла. Газовое реле 1 устанавливается в трубе, соединяющей кожух трансформатора с расширителем так, чтобы через него проходили газ и поток масла, устремляющиеся в расширитель при повреждениях в трансформаторе. В трубе предусмотрена задвижка, которая закрывает ее автоматически при срабатывании газовой защиты, предотвращая поступление масла из расширителя в бак поврежденного трансформатора (для ограничения пожара в баке).



1- газовое реле; 2- расширитель.
Рисунок 13.1- Установка газового реле на трансформаторе

Конструкции газовых реле имеют три разновидности, различающиеся принципом исполнения реагирующих элементов, в виде: поплавка, лопасти, чашки.

Устройство поплавкового газового релепоказано на рисунке 13.2. Реле состоит из чугунного кожуха 1, имеющего вид тройного патрубка с фланцами для соединения с трубкой к расширителю. Внутри кожуха реле расположены два подвижных поплавка 2а и 2б, выполненные в виде тонкостенных полых цилиндров, герметически запаянных и плавающих в масле. Каждый поплавок свободно вращается на оси, закрепленной на стойке. На торце поплавков

располагаются ртутные контакты 3, представляющие собой стеклянные колбочки с впаянными в них контактами и ртутью внутри. При определенном положении поплавков ртуть замыкает контакты. Выводы от контактов на наружную сторону кожуха выполнены с помощью гибких и изолированных проводников. Контакты верхнего поплавка действуют на сигнал, а нижнего - на отключение трансформатора. Кожух реле находится ниже уровня масла в расширителе, поэтому он всегда заполнен маслом. Поплавки, стремясь всплыть, занимают верхнее положение, их контакты разомкнуты.

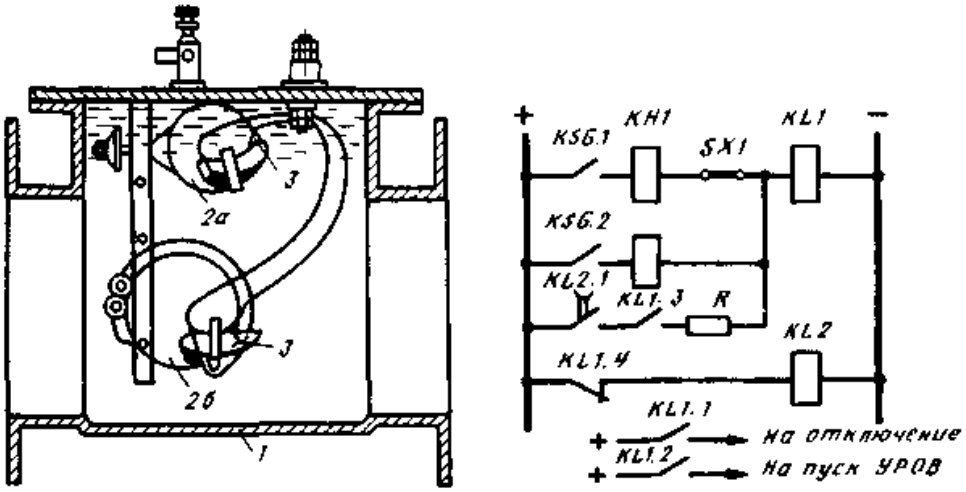


Рисунок 13.2- Устройство поплавкового газового реле; схема выходных цепей газовой защиты

Принебольшихповрежденияхобразование газа происходит медленно, и он небольшими пузырьками поднимается к расширителю. Проходя через реле, пузырьки газа заполняют верхнюю часть его кожуха, вытесняя оттуда масло. По мере понижения уровня масла верхний контакт опускается и через некоторое время замыкается.

Если повреждение трансформатора значительное, то под влиянием давления, создаваемого бурно образующимися газами, масло приходит в движение, сообщая толчок нижнему поплавку. Под его воздействием поплавок мгновенно замыкает свои контакты, посылая импульс на отключение. Поскольку в схемах управления выключателями предусмотрено удерживание отключающих сигналов, даже кратковременного замыкания контактов газового реле оказывается достаточно для надежного отключения выключателя.

Сигнализация о небольших повреждениях вместо отключения позволяет дежурному персоналу перевести нагрузку на другой источник питания и отключить после этого трансформатор.

Газовая защита реагирует также на понижение уровня масла в трансформаторе.

В этом случае первым сработает сигнальный контакт, а затем при продолжающемся снижении уровня масла срабатывает отключающий контакт, выключая трансформатор.

Оценка газовой защиты. Основными достоинствами газовой защиты являются: простота ее устройства, высокая чувствительность, малое время действия при значительных повреждениях, действие на сигнал или отключение в зависимости от размеров повреждения. Газовая защита является наиболее чувствительной защитой трансформатора от повреждения его обмоток и особенно при витковых замыканиях. Все масляные трансформаторы мощностью 1000 кВ • А и выше поставляются вместе с газовой защитой.

Газовая защита не действует при повреждениях на выводах трансформатора, поэтому должна дополняться второй защитой от внутренних повреждений. Для маломощных трансформаторов такой защитой служат МТЗ и токовая отсечка. Для мощных трансформаторов применяется более совершенная дифференциальная РЗ.

14 Лекция № 14. Основные сведения о микропроцессорных устройствах релейной защиты, автоматики

Содержание лекции: основные сведения о микропроцессорных устройствах релейной защиты, автоматики, дистанционного управления. Характеристики микропроцессорных устройств. Установки для проверки устройств РЗА. Шкафы релейной защиты и автоматики, назначение.

Цель лекции: знакомство с новым направлением исполнения элементной базы в виде цифровых терминалов и новой аппаратуры для проверки цифровых терминалов.

Большинство фирм производителей оборудования РЗА прекращают выпуск электромеханических реле и устройств и переходят на цифровую элементную базу. Переход на новую элементную базу не приводит к изменению принципов релейной защиты и электроавтоматики, а только расширяет ее функциональные возможности, упрощает эксплуатацию и снижает ее стоимость. Именно по этим причинам микропроцессорные устройства очень быстро занимают место устаревших электромеханических и микроэлектронных устройств.

Основные характеристики микропроцессорных защит значительно выше, чем у микроэлектронных, а тем более электромеханических. Так, мощность, потребляемая от измерительных трансформаторов тока и напряжения, находится на уровне 0,1—0,5 ВА, аппаратная погрешность — в пределах 2—5%, коэффициент возврата измерительных органов составляет 0,96—0,97.

Использование цифровых способов обработки информации в устройствах РЗА существенно расширило их возможности и улучшило

эксплуатационные качества. Современные цифровые устройства РЗА интегрировали в рамках единого информационного комплекса функции релейной защиты, автоматики, измерения, регулирования и управления электроустановкой. Такие устройства в структуре автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) энергетического объекта являются оконечными устройствами сбора информации.

В интегрированных цифровых комплексах РЗА появляется возможность перехода к новым нетрадиционным измерительным преобразователям тока и напряжения - на основе опто-электронных датчиков, трансформаторов без ферромагнитных сердечников и т. д. Эти преобразователи технологичнее при производстве, обладают очень высокими метрологическими характеристиками, но имеют малую выходную мощность и непригодны для работы с традиционной аппаратурой.

14.1 Краткое описание аппаратной части. Структурная схема, аналоговые входы

Измерительные входы преобразуют сигналы о токах и напряжениях, полученные от измерительных трансформаторов, и приводят их к уровню, на котором осуществляется обработка данных сигналов в устройстве. В устройстве предусмотрено 4 токовых входа. В зависимости от модели, устройство также имеет три или четыре входа напряжения. Три токовых входа служат для подведения фазных токов. В зависимости от модели, четвертый токовый вход (IH) может использоваться для измерения тока замыкания на землю IH (подводимого от общей точке обмоток ТТ, соединенных в звезду) или для подведения тока замыкания на землю от отдельного ТТ (чувствительный вход тока замыкания на землю IHs и определение направления замыкания на землю).

Входы напряжения могут использоваться или для измерения трех фазных напряжений, или двух междуфазных напряжений и напряжения смещения (VH). Возможно также подключение двух междуфазных напряжений в «разомкнутый треугольник». Четыре входа напряжения могут использоваться как для подведения 3 фазных напряжений и одного напряжения смещения от обмотки, соединенной в разомкнутый треугольник, так и для подачи другого напряжения для функции синхронизации. Аналоговые входные величины подаются на входные усилители. На входном усилителе обеспечивается высокоомное ограничение аналоговых входных величин. Оно обеспечивается фильтрами, настроенными на обработку измеренных величин с учетом необходимой полосы пропускания частот и требуемого быстродействия.

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) состоит из мультиплексора, АЦП и элементов памяти, предназначенных для передачи цифровых сигналов в микропроцессорную систему.

Микропроцессорная система. Кроме обработки измеренных значений, микропроцессорная система (МП) также выполняет текущие функции защиты и управления. Это, главным образом, включает в себя следующее:

1) Фильтрация и подготовка измеряемых величин к обработке.

2) Непрерывный контроль измеряемых величин.

3) Контроль условий срабатывания отдельных функций защиты.

4) Опрос предельных значений и последовательностей во времени.

5) Управление сигналами для логических функций.

6) Формирование выходных команд для коммутационных устройств.

7) Запись сообщений, данных и величин повреждений для проведения последующего анализа.

8) Управление операционной системой и соответствующими функциями, такими, как регистрация данных, управление часами реального времени, процессом обмена данными, а также интерфейсами и т.д..

9) Информация выдается через выходные усилители.

Дискретные входы и выходы. Ввод/вывод дискретной информации в микропроцессор осуществляется через блоки дискретных входов/выходов устройства. Через дискретные входы в устройство вводится информация от электроустановки (например, о состоянии коммутационных аппаратов) или от других средств управления (например, команды запрета или разрешения). Выходными являются, в частности, команды к коммутационному оборудованию и сообщения, сигнализирующие о важных событиях и состояниях.

Элементы лицевой панели. В устройствах с интегрированной или выносной панелью управления информация, такая как сообщения о событиях, состояниях, измеренные значения и функциональное состояние устройства отображается с помощью светодиодов (LED) и жидкокристаллического дисплея (ЖК-дисплея) на лицевой панели управления. Интегрированные цифровые кнопки и кнопки управления совместно с ЖК-дисплеем облегчают взаимодействие с устройством. С помощью этих элементов обеспечивается доступ ко всем данным устройства, таким как конфигурация и параметры, рабочие сообщения и сообщения о повреждениях, измеренные значения. С помощью этих элементов возможно изменение параметров устройства.

Кроме того, с лицевой панели управления возможно управление выключателями и другим оборудованием.

Последовательные интерфейсы. Последовательный интерфейс оператора на лицевой панели предназначен для местного обмена данными с устройством через ПК с использованием программы DIGSI. Это обеспечивает удобное управление всеми функциями устройства.

Отдельный интерфейс сервисный интерфейс может также быть использован в устройстве для обмена данными с удаленным центром через ПК с использованием DIGSI. Этот интерфейс, главным образом, предназначен для проводного подключения устройства к ПК или для работы через модем.

Сигналы, контролируемые устройствами РЗА, имеют, в общем случае, разную физическую природу — токи, напряжения, температура и т. д. Чаще всего устройства РЗ работают с сигналами от источников переменного тока и напряжения, с традиционными номинальными уровнями: 1 А, 5 А, 100 В. Такие уровни сигналов обеспечивают необходимую помехозащищенность, но совершенно неприемлемы для обработки в электронных схемах. При подключении микропроцессорных устройств к традиционным датчикам тока и напряжения требуется приведение их сигналов к единому виду и диапазону изменения, приемлемому для обработки электронными узлами.

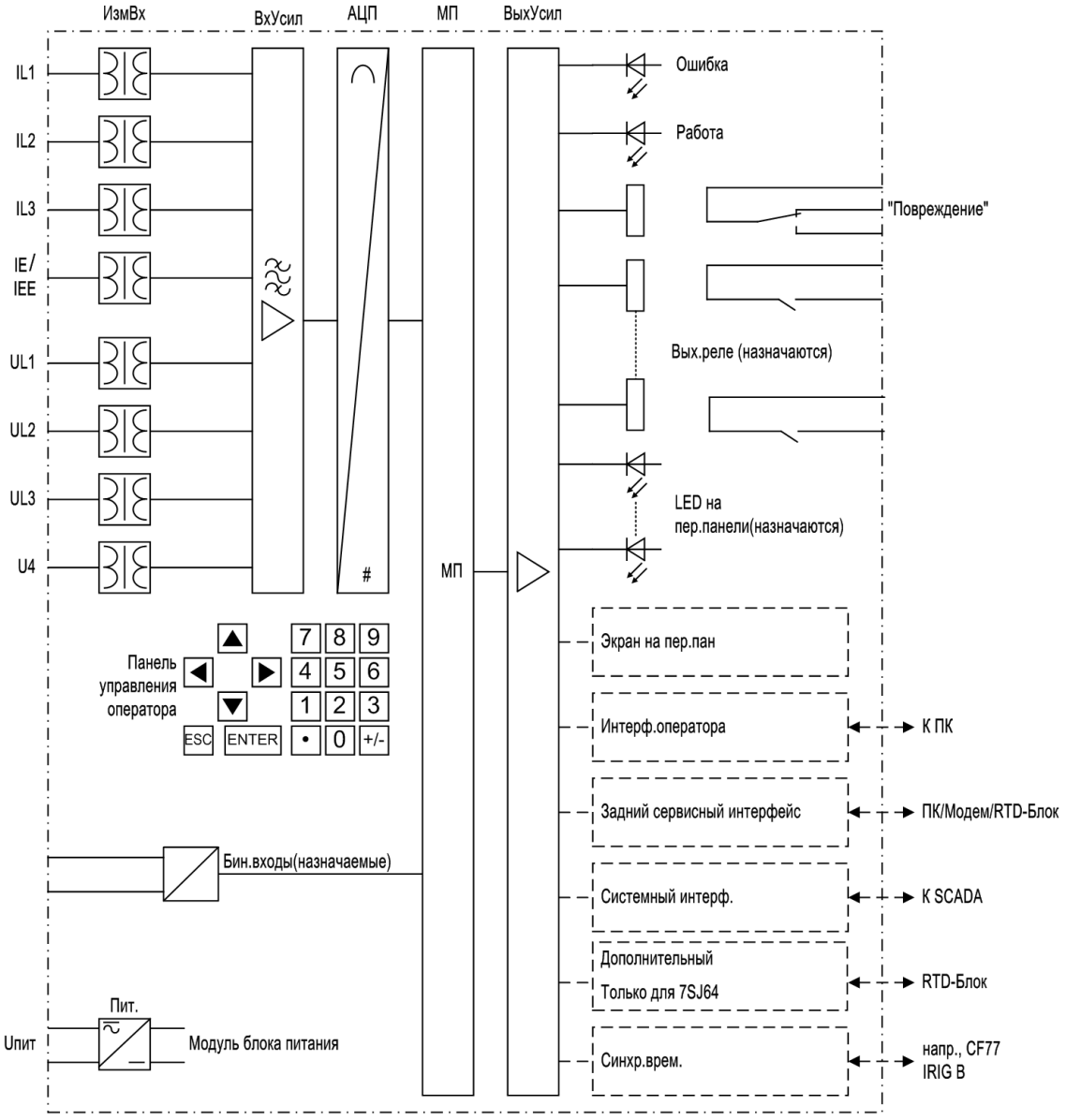


Рисунок 14.1- Структурная схема цифрового устройства защиты

Входные преобразователи. Наиболее часто входные согласующие преобразователи цифровых устройств выполняются на базе обычных электромагнитных трансформаторов с ферромагнитным сердечником. Не-

смотря на то, что такие трансформаторы имеют нелинейные передаточные характеристики, определенный разброс параметров, некоторую нестабильность во времени и при изменении температуры, они все же приемлемы для построения устройств РЗ, допускающих работу с погрешностью 2—5%.

Аналогово-цифровые преобразователи. Дискретный (цифровой) сигнал, в отличие от аналогового, может принимать лишь конечное множество значений и определен лишь для конкретных моментов времени. Процесс перехода от аналогового сигнала к дискретному называется дискретизацией или квантованием сигнала, а устройства, выполняющие эту операцию, называются аналого-цифровыми преобразователями (АЦП).

Переход от непрерывного сигнала к дискретному всегда происходит с потерей некоторого количества информации. Конечное число градаций дискретного сигнала обуславливает погрешность квантования по уровню, а одной из причин необходимости квантования по времени является то, что и сам процесс аналого-цифрового преобразования, и последующий цикл вычислений в микроЭВМ требует определенного времени, по истечении которого можно делать новую выборку из входного сигнала

Более того, при аналого-цифровом преобразовании из входного сигнала должны быть исключены все гармоники с частотой, более высокой, чем частота квантования. В устройствах РЗА применяют АЦП с частотой выборок от 600 до 2000 Гц. Более высокая частота выборок используется в том случае, когда устройства защиты обеспечивает еще и осциллографирование аварийного процесса.

Цифровое устройство с частотой выборок 2000 Гц эквивалентно осциллографу с полосой пропускания 0—1000 Гц. Для сравнения отметим, что запись звука на компакт-дисках осуществляется с частотой дискретизации около 44 кГц, что обеспечивает качественное воспроизведение фонограмм, включая частоты свыше 20 кГц.

Ограничение полосы пропускания тракта в области высоких частот необходимо и для правильной работы аналого-цифрового преобразователя, независимо от того, будет ли в последующем применяться цифровая фильтрация сигналов или нет.

Ввод дискретных сигналов. Практически во всей современной электронной аппаратуре ввод дискретных сигналов осуществляется через преобразователи на основе оптронов. Следует отметить, что схемы реальных преобразователей гораздо сложнее, чем схемы, приведенные на рисунке 13.3. Собственное время переключения оптронов составляет доли микросекунды. Для оптопары (светодиод-фотоприемник) характерна малая проходная емкость, что препятствует проникновению помех по этому пути. Допустимое напряжение между цепью управления и элементами управляемой цепи достигает нескольких киловольт, а рабочий ток светодиода VD составляет 3—5 мА.

Малый входной ток оптрона с одной стороны является благом, так как приводит к снижению мощности, потребляемой преобразователем, решает проблему рассеивания тепла резистора $R_б$ и уменьшает нагрузку на управляющий контакт S2 (рисунок 14.3, а). Но с другой стороны, малый рабочий ток оптрона приводит к ряду проблем.

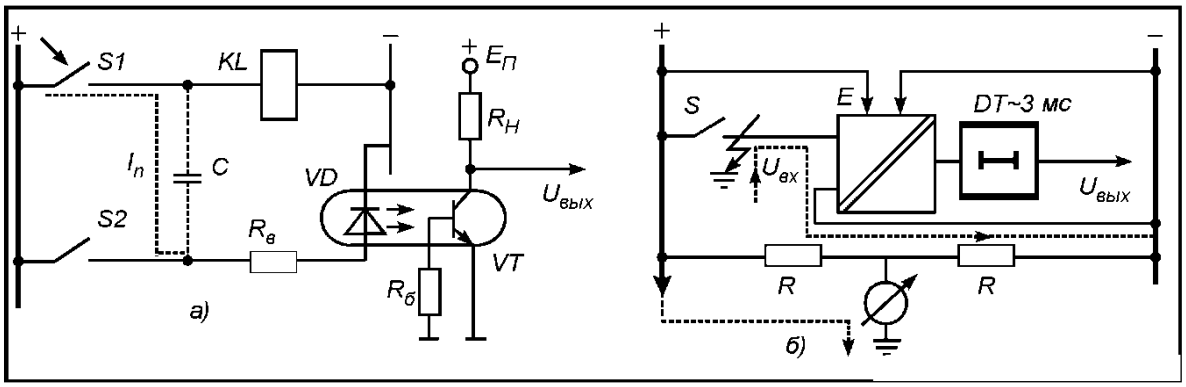


Рисунок 14.3-Варианты ввода дискретного сигнала

В первую очередь, малый входной ток обуславливает низкую помехозащищенность преобразователя. Например, при наличии протяженного проводника, связывающего управляющий ключ S2 с оптроном, возможно ложное срабатывание при перезарядке паразитной емкости С в момент замыкания ключа S1 в сторонней цепи. Чтобы исключить ложную работу устройства РЗ в такой ситуации, на выходе преобразователя устанавливают элемент задержки DT (рисунок 14.3, б) с фиксированной или регулируемой задержкой в формировании выходного сигнала. Для того, чтобы отстроиться от переходных процессов, обычно достаточно задержки 0,5—3 мс.

Устройства с малым потреблением могут реагировать на замыкания на землю в сети оперативного тока, так как их входной ток соизмерим с током цепи контроля изоляции сети оперативного тока. Для исключения этого, входные цепи измерительного преобразователя Е выполняют с привязкой к потенциалам полюсов сети оперативного тока, и поднимают порог переключения преобразователя Е до уровня 60—80% номинального напряжения сети.

Выходные реле. Несмотря на очевидные достижения в области высоких потенциалов и сильных токов, в цифровых устройствах, в большинстве случаев, в качестве выходных элементов по-прежнему используются промежуточные электромагнитные реле. Контактная пара пока еще остается вне конкуренции как единственное устройство, обеспечивающее видимый разрыв в коммутируемой цепи. К тому же, это и самое дешевое решение. Как правило, в цифровых устройствах РЗ применяются несколько типов малогабаритных реле: с большей коммутационной способностью — для работы непосредственно в цепях управления выключателей, с меньшей — для работы в цепях сигнализации.

Мощные реле способны включать цепи с током примерно 5— 30 А, но их отключающая способность обычно не превосходит 0,2 А при постоянном напряжении 220 В. Таким образом, схема управления должна предусматривать прерывание тока в цепи электромагнита выключателя его вспомогательным контактом. Отключающая способность применяемых сигнальных реле обычно не превышает 0,15 А в цепях постоянного тока напряжением 220 В.

Отображение информации. Для отображения информации в микропроцессорных устройствах используются и отдельные светодиодные индикаторы, жидкокристаллические минидисплеи, и даже графические экраны. Для простоты будем называть совокупность элементов визуального отображения информации в устройстве дисплеем.

Цифровое устройство защиты — это устройство, которое способно предоставить оператору очень большой объем информации: текущие значения токов и напряжений электроустановки, их аварийные значения, уставки (а их в цифровых устройствах может быть несколько наборов), состояние входов и выходов управления и т. д. Для оперативного получения такого объема информации требуются соответственно и более информативные дисплеи.

В более современных устройствах применяются цифробуквенные многострочные табло, что обеспечивает удобство считывания информации. Такие табло выполняются на основе жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ). Основными недостатками ЖК-индикаторов являются относительно низкая контрастность изображения и неработоспособность при низких температурах. Однако, невысокая стоимость и легкость управления ЖКИ способствует их широкому применению, в том числе и в устройствах РЗА. В последнее время появились более дорогие ЖКИ, способные работать при температурах до -25°С.

15 Лекция №15. Установки для проверки устройств РЗА

Содержание лекции: основные сведения оустановках для проверки устройств РЗА. Шкафы релейной защиты и автоматики, назначение.

Цель лекции: знакомство с установками для проверки устройств РЗА.

Для выполнения проверки устройств РЗА необходимо регулировать в широких пределах и измерять величину тока и напряжения, измерять время срабатывания и возврата устройств. В более сложных случаях необходимо регулировать и измерять величину мощности, сопротивление, частоту, угол между током и напряжением.

Все это можно реализовать, собирая для каждого случая схему из различных приборов: реостатов, ЛАТРов, промежуточных трансформаторов, измерительных приборов. Однако значительно удобнее иметь одну испытательную установку, предназначенную для проверки устройств РЗА и содержащую всю эту аппаратуру.

Вот некоторые разновидности установок для проверки устройств РЗА:

1) Установки для проверки простых защит.

2) Установки для проверки сложных защит.

3) Автоматизированные микропроцессорные установки.

4) Генераторы технической частоты.

5) Аппаратура для проверки ВЧ трактов защит.

Установки выполняются однофазными. К таким установкам можно отнести У-5052 или ЭУ-5000 Ретом 21 – «Динамика» Чебоксары и др.

Установки для проверки сложных защит. Эти установки дополнительно имеют возможность создавать одновременно однофазный (или трехфазный) ток и трехфазное напряжение; имеют возможность регулировать угол между током и напряжением, что позволяет использовать их для проверки реле сопротивления, мощности. В эти установки дополнительно входит фазорегулятор и фазометр для измерения фазы. К таким установкам относится устройство У-5053 , Ретом 61, OMICRON и др.

Автоматизированные микропроцессорные установки. Эти установки построены на совершенно новых принципах: взамен трансформации питающего напряжения для получения нужной величины тока и напряжения, они содержат управляемые генераторы тока и напряжения. С учетом микропроцессорного управления они могут выдавать на реле точно заданную величину тока и напряжения. Установки позволяют по заданной программе производить изменение параметров и анализировать работу защиты, что дает возможность автоматизировать процесс проверки устройства защиты.

Некоторые установки позволяют имитировать по осциллограмме, записанной цифровым осциллографом или микропроцессорным реле процесс аварии, что дает возможность проанализировать работу защиты при аварии. Управлять установкой можно с места, или с помощью подключенного к ней переносного или персонального компьютера. Такие устройства обычно ориентируются на аналоговые или цифровые устройства с малым потреблением, так как имеют малую мощность: выходной ток 10–20 А при напряжении на нагрузке 10–15 В, напряжение 120 В, при токе нагрузки 0,5 А.

Количество таких устройств, предоставляемых разными фирмами достаточно велико. Это РЕТОМ – 61, используются также проверочные установки фирмы OMICRON, например СМС-356.

Шкафы релейной защиты и автоматики, назначение.Современные комплектные микропроцессорные устройства обеспечивают выполнение всех функций, необходимых для присоединения. Кроме непосредственно функций основной и резервной защиты они обеспечивают также контроль за состоянием выключателя, телеуправление, местное управление из шкафа, или дистанционное управление по локальной сети, регистрацию событий, осциллографирование аварийных процессов, измерение текущих электрических величин, передачу этой информации на верхний уровень управления. Все это входит в функциональный объем одного или двух микропроцессорных устройств РЗА. Для того чтобы обеспечить связи

устройства с оборудованием своего и смежных присоединений, требуется еще некоторое количество промежуточных реле, автоматы оперативного тока, резисторы, диоды и некоторые другие элементы. Для подключения внешних контрольных кабелей, локальной сети и прочих элементов требуется клеммник на значительное количество клемм.

Раньше все эти элементы располагались на нескольких панелях: основная защита, резервная защита, автоматика линии и выключателя, панель управления, панель измерения с измерительными преобразователями для телемеханики. Итого: четыре панели для линии 110 кВ, пять панелей для трехобмоточного трансформатора, семь панелей для линии 330 кВ.

Используя микропроцессорные устройства, все эти функции удается поместить в одном шкафу, и только для линий напряжением 330 кВ и выше, а также мощных энергоблоков, у которых для надежности, требуется выполнить две самостоятельные системы защиты: группы «А» и «В», питающиеся от отдельных аккумуляторных батарей, трансформаторов тока и напряжения, действующих на разные соленоиды отключения, требуется два отдельных шкафа. В один шкаф возможно поместить защиту и автоматику двух линий 110–220 кВ, двух трансформаторов, пяти присоединений 35 кВ и ниже.

Такое размещение дает значительную экономию труда и материалов: не требуются контрольные кабели для связи между панелями и необходимые им клеммы, остаются только связи со своим и чужими присоединениями.

Список литературы

Основная

1 Булычев, А. В. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебное пособие/А. В. Булычев, В. К. Ванин, А. А. Наволочный, М. Г. Попов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 211 с.

2 Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем/Под ред. А.Ф. Дьякова. - М.: Изд. МЭИ, 2002. - 295 с.

3 Шабад М.А. Расчеты РЗ и А распределительных сетей: Монография. - СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

4 Овчинников В.В. Защита электрических сетей 0,4-35 кВ - Ч.1, Ч.2. - М.: Издательство редакции журнала «Энергетик», 2002.

5 Шабад М.А. Защита генераторов малой и средней мощности. - М.: НТФ « Энергопрогресс», 2001.- 96 с.

6. Правила устройства электроустановок Минэнерго РК. Издание - Астана, 2008.

Дополнительная

1 Чернобровов Н.В., Семенов В.А. "Релейная защита энергетических систем: Учебное пособие для техникумов". - М.: Энергоатомиздат, 1998.

2 Авербух А.М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. - М.: Энергия, 1975. - 416 с.

3 Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций/Под ред. Э.С. Мусаэляна. - М.: Энергоатомиздат, 1989.

4 Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 112 с.

5 Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Расчеты. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 96 с

Сводный план 2016 г., поз.183

Башкиров Михаил Владимирович
Мерекенов Мурат Дюсенгалиевич

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Конспект лекций для студентов специальностей
5В071800 – Электроэнергетика,
5В081200- Энергообеспечение сельского хозяйства

Редактор Н.М. Голева
Специалист по стандартизации Н.К. Молдыбекова

Подписано в печать _____ Формат 60х84 1/16
Тираж 50 экз. Бумага типографская №1
Объем 4,69 уч.- изд.л. Заказ ___. Цена 2345тг.

Копировально - множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013 Алматы, ул. Байтурсынова, 126