

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

В.А.Черных

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ОТ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35КВ
РАБОТАЮЩИХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Магистерская диссертация на соискание
академической степени магистра электроэнергетики
по специальности 6М0718 - Электроэнергетика

ПАВЛОДАР – 2013

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Инновационный Евразийский университет

Допущен к защите:
зав. кафедрой «Электроэнергетики»,
доктор технических наук,
профессор _____ Е.В. Иванова
(подпись)

«__» _____ 20__ г

Магистерская диссертация

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ОТ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35КВ
РАБОТАЮЩИХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

специальность: 6М0718 - Электроэнергетика

Магистрант

(подпись)

В.А. Черных
(инициалы, фамилия)

Научный руководитель,
кандидат технических наук

(подпись)

Б.К. Шапкенов
(инициалы, фамилия)

ПАВЛОДАР – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Защита от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью	
1.1 Токи и напряжения в сети с изолированной нейтралью.....	7
1.2 Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью.....	18
1.3 Принципы построения защит от однофазных замыканий на землю.....	21
1.3.1 Защиты от замыканий на землю, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности установившегося режима.....	23
1.3.2 Оценка защит от однофазных замыканий на землю и пути их совершенствования.....	28
1.4 Фильтры тока и напряжения нулевой последовательности.....	31
1.5 Реагирующие органы защит.....	40
1.6 Выводы.....	48
2 Преобразователи тока на герконах и катушках индуктивности	
2.1 Герконы их свойства и возможность использования в релейной защите.....	49
2.2 Максимальная токовая защита на герконах для сетей с изолированной нейтралью.....	52
2.3 Катушки индуктивности как преобразователи тока.....	61
2.4 Выводы.....	69
3 Защита от замыканий на землю на герконах и катушках индуктивности	
3.1 Разработка защиты на герконах и катушках индуктивности.....	70
3.2 Усилители тока.....	72
3.3 Выбор порога срабатывания защит.....	80
3.4 Экспериментальные данные исследования устройства защиты кабельных линий.....	83
3.5 Выводы.....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	88

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЭДС	электродвижущая сила
МДС	магнитодвижущая сила
ТНП	трансформатор нулевой последовательности
МТНП	магнитный трансформатор нулевой последовательности
МТТ	магнитный трансформатор тока
ОЗЗ	однофазное замыкание на землю
АД	асинхронный двигатель
КЛ	кабельная линия
МК	магнитоуправляемый контакт
МТЗ	максимальная токовая защита
ТТ	трансформатор тока
ТН	трансформатор напряжения
ТТНП	трансформатор тока нулевой последовательности
МЭ	магниточувствительный элемент
ВЛ	воздушная линия
ТОЭ	теоретические основы электротехники
ДГР	дугогасящий реактор
ПП	переходный процесс
РЗ	релейная защита
РУ	распределительное устройство

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы: Как известно сети 6-35 кВ обычно работают в режиме изолированной нейтрали. При этом однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в них составляют большую часть от всех замыканий в сети.

ОЗЗ не приводит к появлению значительных токов и поэтому не требует немедленного отключения. По ПТЭ этот режим может существовать до двух часов. Однако при ОЗЗ поврежденная фаза принимает потенциал земли, а потенциал целых возрастает до линейного напряжения. Что способствует ускоренному электрическому старению изоляции. Как свидетельствует статистика мирового опыта эксплуатации этих сетей 60-80% ОЗЗ в сетях 6-10 кВ развиваются в междуфазные короткие замыкания. Около 40% из них возникают из-за термического действия дуги в месте замыкания в сетях с значительным током ОЗЗ и более 60% обусловлены пробоем изоляции из-за дуговых перенапряжений. Последнее характерно для сетей собственных нужд электростанций с током ОЗЗ 10А и более.

При однофазном замыкании обмотки электрической машины на корпус (ОЗК) в зависимости от места расположения точки замыкания токи ОЗК и потенциал поврежденных фаз относительно земли уменьшаются. Тем не менее, электрическая дуга в обмотке машины в очень короткое время способна привести к междуфазному замыканию в ней, а также к полному выходу машины из строя.

Все это в условиях постоянно ухудшающегося технического состояния оборудования сетей, значительная часть которого уже давно выработала свой ресурс, вероятность и частота возникновения аварийных ситуаций резко возрастает. Что не может не сказаться на снижении надежности передачи электроэнергии.

Для определения возникновения ОЗЗ в сети на подстанциях с обслуживающим персоналом часто используют общую сигнализацию. Такой способ обнаружения ОЗЗ прост и дешев. Однако поиск поврежденного элемента методом последовательного отключением каждой из линий у обслуживающего персонала занимает много времени и не всегда возможен.

Для защиты радиальных кабельных сетей традиционно используют простые токовые защиты от ОЗЗ. Наибольшее распространение в кабельных сетях в качестве фильтра получил трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП) типа ТЗЛ или ТЗРЛ с кольцевым сердечником. В качестве чувствительного измерительного органа используются специальные и довольно дорогие реле. Так как цена таких защит высока, то часто вместо нее в неответственных сетях разработчики иногда склоняются к использованию общей сигнализации со всеми ее недостатками.

Избежать этого можно, если в защите от ОЗЗ кабеля совместить трансформатор тока нулевой последовательности с измерительным органом, например, герконом. Что значительно снизит цену защиты, а защита при этом может приобрести новые полезные свойства.

В связи с этим разработка относительно недорогой и доступной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях является актуальной.

Целью работы является разработка новой защиты от однофазных замыканий на землю на кабельных линиях в сетях с изолированной нейтралью.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ существующих защит от замыканий на землю в сетях и изолированной нейтралью;
- совершенствование методов расчета переходных режимов;
- разработка специального трансформатора тока нулевой последовательности;
- разработка реагирующего органа защиты от замыканий на землю на основе использования герконов;
- разработка методики расчета параметров уставки срабатывания защиты от замыкания на землю.
- Оценка чувствительности разработанной защиты.

Объектом исследования являются защиты от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью.

Предмет исследования — защита от замыканий на землю на трансформаторах тока нулевой последовательности.

Инструментом в получении материалов исследования являются:

- фундаментальные положения математики;
- фундаментальные положения теории релейной защиты;
- фундаментальные положения теории электрических машин;
- фундаментальные положения теоретических основ электротехники;
- физическое моделирование и метод натурного эксперимента;
- программирование на Micro-cap и Electronics Workbench.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Разработана математическая модель однофазного замыкания в электрической машине;
2. Исследована возможность построения релейной защиты кабеля с использованием трансформатора тока нулевой последовательности;
3. Предложен способ защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом;
4. Предложены методы повышения чувствительности защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом;
5. Разработан метод определения порога срабатывания релейной защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом.

Практическая ценность работы определяется тем, что:

1. Предложенный метод моделирования электродвижущей силы кабельного магнитного трансформатора нулевой последовательности дает возможность рассчитать его параметры;
2. Разработанная защита от замыкания на землю, позволяет выявлять замыкания с очень малыми токами 0,54А.

Апробация результатов исследования: получение инновационного патента на изобретение. Публикации результатов исследований в «Вестнике ПГУ».

На защиту выносятся:

- Обзор существующих защит от однофазных замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью;
- Апробация результатов исследования;
- Разработка математической модель однофазного замыкания в электрической машине;
- Исследование возможности построения релейной защиты кабеля с использованием трансформатора тока нулевой последовательности;
- Способ защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом;
- Предложенные методы повышения чувствительности защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом;
- Разработка метода определения порога срабатывания релейной защиты кабеля от однофазного замыкания на землю на ТТНП с герконом.

1 Защита от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью

1.1 Токи и напряжения в сетях с изолированной нейтралью

Электрические сети напряжением 6-35кВ работают, как правило, с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через большое индуктивное сопротивление дугогасящего реактора (ДГР), а также с заземлением через большое, активное сопротивление. В отличие от сети с глухозаземленной нейтралью, однофазное замыкание в сети с изолированной нейтралью не сопровождается появлением больших токов КЗ, поскольку ток повреждения замыкается на землю через очень большие сопротивления емкостей фаз сети.

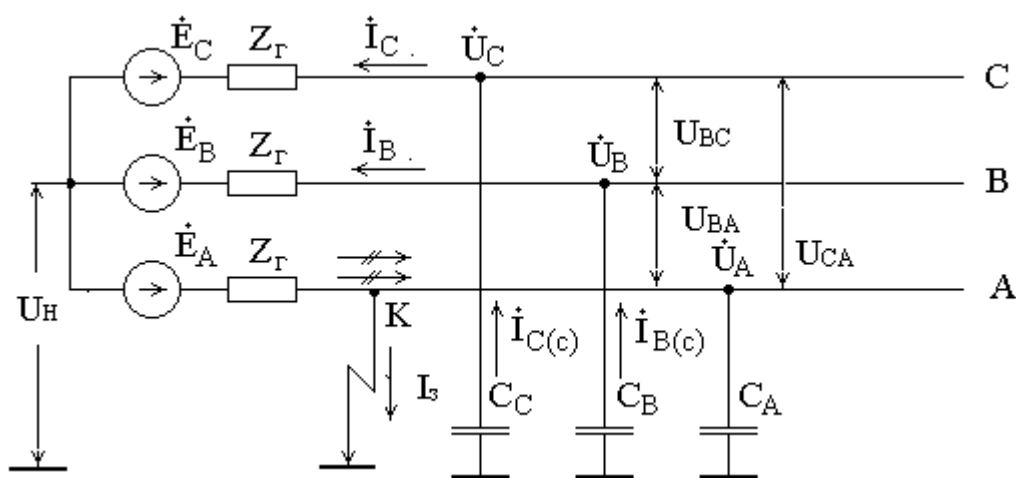


Рисунок 1 – Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью

Рассмотрим характер изменения напряжения и токов в сети и их векторные диаграммы в нормальных условиях и при однофазном замыкании на землю в режиме, когда нейтраль сети изолирована, замкнута через дугогасящий реактор или через активный резистор. Для упрощения принимаем, что нагрузка сети отсутствует. Это позволяет считать фазные напряжения во всех точках сети неизменными и равными ЭДС фаз источника питания. На рисунке 1 приведена радиальная сеть с изолированной нейтралью с источником питания и одной эквивалентной ЛЭП, условно представляющей всю сеть. Распределенная емкость фаз относительно земли заменена эквивалентной сосредоточенной емкостью C_0 . Сопротивления R и X ЛЭП не учитываются. Емкость источника питания также не учитывается вследствие ее малого значения.

В нормальном режиме напряжения проводов А, В и С по отношению к земле равны соответствующим фазным напряжениям U_A , U_B , U_C , которые при отсутствии нагрузки равны ЭДС источника питания E_A , E_B , E_C . Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду в соответствии с рисунком 2,а, а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали N отсутствует: $U_N = 0$. Под действием фазных напряжений через емкости фаз

относительно земли C_A , C_B , C_C проходят токи, опережающие фазные напряжения на 90° :

$$I_A = U_A / -jX_C; I_B = U_B / -jX_C; I_C = U_C / -jX_C, \quad (1)$$

где:

$$X_C = 1/\omega C_0. \quad (2)$$

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому $3I_0$ отсутствует в соответствии с рисунком 2,а.

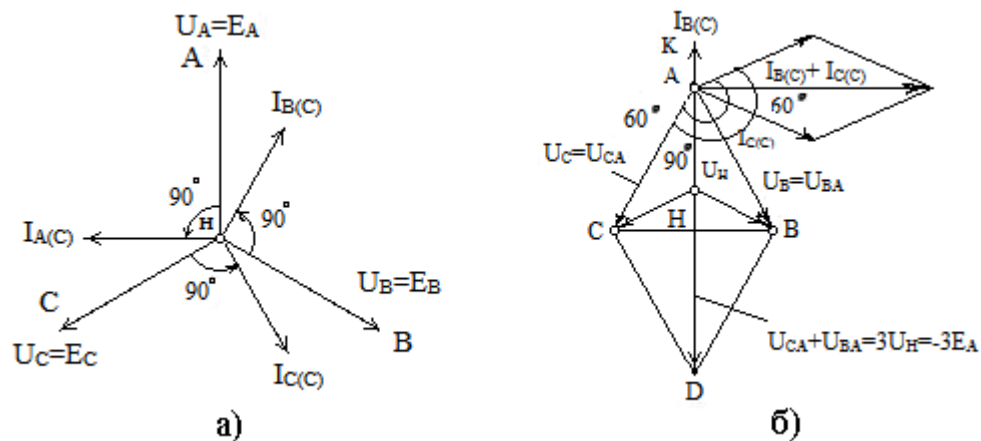


Рисунок 2 – Векторные диаграммы фазных токов и напряжений:

а – нормальный симметричный режим; б – при замыкании одной фазы на землю

Металлическое замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью. Допустим, что повредилась фаза А (рисунок 1), тогда ее фазное напряжение относительно земли снижается до нуля ($U_A = 0$). Напряжение нейтрали U_N по отношению к земле становится равным $U_N = U_{KN}$ в соответствии с рисунком 1 и 2,б, т.е. напряжению, равному по значению и обратному по знаку заземлившейся фазы:

$$U_N = U_{KN} = -E_A. \quad (3)$$

Напряжение неповрежденных фаз относительно земли повышаются до междуфазных значений $U_{B(1)} = U_{BA}$ и $U_{C(1)} = U_{CA}$. Междуфазные напряжения остаются неизменными, что видно из рисунка 1 и 2.

В соответствии с рисунком 2,б построена векторная диаграмма напряжений проводов и нейтрали сети по отношению к земле ($U_{B(1)}$, $U_{C(1)}$, U_N): точки А, В, С представляют потенциалы проводов, точка N соответствует нейтрали источника питания, точка А связана с землей и имеет нулевой потенциал.

Токи при замыкании на землю в месте повреждения К, замыкающиеся через емкости неповрежденных фаз сети [1]. Поскольку $U_A = 0$, то $I_{A(C)} = 0$. В

двух других фазах под действием напряжений U'_B и U'_C появляются токи, опережающие на 90° эти напряжения:

$$\text{и} \quad (4)$$

Ток $I_{3(C)}$ в месте повреждения равен сумме токов в фазах В и С в соответствии с рисунком 1:

$$I_{3(C)} = I_{B(C)} + I_{C(C)}. \quad (5)$$

Поскольку $U_{BA} + U_{CA} = -3E_A$ (рисунок 2, б):

$$(6)$$

Таким образом, ток $I_{3(C)}$ равен утроенному значению нормального емкостного тока фазы $I_{\phi(C)} = U_{\phi} / X_C$. Из рисунка 2,б видно, что ток $I_{3(C)}$ опережает напряжение U_N на 90° . Ток $I_{3(C)}$ может быть определен по формуле:

$$I_{3(C)} = 3I_{C\phi} = 3U_{\phi} / X_C = 3U_{\phi} \omega C_{уд} l \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

где l – общая протяженность одной фазы сети;
 $C_{уд}$ – емкость 1км фазы относительно земли.

В воздушных сетях $I_{3(C)}$ находится в пределах от долей до нескольких десятков ампер; в кабельных – от нескольких ампер до 200-400А в сетях больших городов[2].

Поскольку токи замыкания на землю имеют небольшие значения, а все междуфазные напряжения остаются неизменными в соответствии с рисунком 2,б, то однофазное замыкание не представляет непосредственной опасности для потребителей. Защита от этого вида повреждений, как правило действует на сигнал. Однако длительная работа сети с заземленной фазой нежелательна, так как длительное прохождение тока в месте замыкания на землю, а так же повышенное в 1,73 раза напряжения неповрежденных фаз относительно земли могут привести к пробое или повреждению их изоляции и возникновению двухфазного короткого замыкания. Поэтому допускается работа сети с заземлением одной фазы только в течение 2 часов.

С изолированными нулевыми точками трансформаторов и генераторов или заземленные через компенсирующие катушки работают сети напряжением 35кВ и ниже [1, 2].

Ток однофазного замыкания на землю зависит от напряжения сети и ее емкости относительно земли. Чем выше напряжение сети или чем больше емкость, тем больше ток замыкания на землю.

Емкость сети зависит от ее протяженности и типа сети: при одинаковой протяженности кабельной сети имеет емкость значительно большую, чем воздушные. Так, например, ток замыкания на землю на каждые 100 км сети напряжением 6 кВ примерно составляет 1,5 А для воздушных 80 А, для кабельных линий (при сечении кабелей 95 мм²).

Для уменьшения тока замыкания на землю используют компенсирующие катушки, через которые заземляются нулевые точки трансформаторов и генераторов. Компенсирующие катушки создают индуктивный ток, который имеет противоположенное направление по отношению к емкостному току сети, и тем самым в зависимости от настройки либо компенсируют емкостной ток, либо уменьшают его.

Таким образом, поскольку междуфазные напряжения при замыкании на землю остаются неизменными, и ток замыкания на землю имеет небольшое значение, замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью непосредственной опасности для потребителей не представляют. Следовательно быстрого отключения, не требуется. Исключение составляют сети, питающие торфоразработки и передвижные механизмы.

Повышение фазных напряжений в 1,73 раза может вызвать перекрытие или пробой изоляции на второй фазе, что приведет к образованию двойного замыкания на землю, т.е. к двухфазному короткому замыканию.

Длительное прохождение тока однофазного замыкания на землю в месте замыкания так же может привести к повреждению изоляции и возникновению междуфазного короткого замыкания. Поэтому чрезмерно длительная работа сети с однофазным замыканием на землю недопустима, и поврежденный участок должен быть выявлен и отключен. (Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей допускается работа с замыканием на землю в течении 2 часов).

На электростанциях и подстанциях с большим количеством линий и при разветвленной сети кроме контроля изоляции устанавливается на каждой линии индивидуальная селективная сигнализация однофазных замыканий. Сигнализация должна выполняться с действием на сигнал, а не отключение. Ток срабатывания реле индивидуальной сигнализации должен удовлетворять условиям селективности и чувствительности. Условие селективности состоит в том, что сигнализация не должна работать от тона небаланса при максимальном токе нагрузки линии $I_{нб, \max}$, а так же емкостного тока линии при замыкании на землю на другой линии. Последнее условия поясняется в соответствии с рисунком 3, на котором показана сеть, состоящая из трех линий.

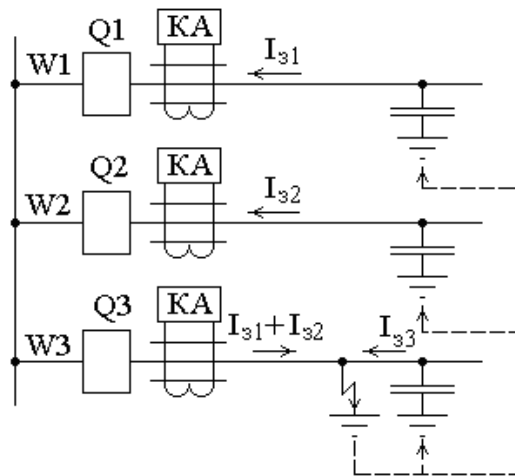


Рисунок 3 – Прохождение токов замыкания на землю в сети с изолированными нулевыми точками

Если однофазное замыкание на землю произошло на линии W3, то по линиям W1 и W2 в направлении шин подстанции, через их емкости будут проходить токи I_{31} и I_{32} . Если ток срабатывания устройств, установленных на линиях W1 и W2, не отстроить от этих токов, то при замыкании на землю на линии W3 сработают устройства сигнализации на всех трех линиях и определить поврежденную линию будет невозможно.

Отстройка от собственного емкостного тока, всегда обеспечивает отстройку от тока небаланса. Поэтому ток срабатывания определяется:

$$I_{сз} = R_n \frac{I_{C,сoб}}{K_1} \quad (8)$$

где $I_{C,сoб}$ - собственный емкостной ток линии при однофазном замыкании на землю на другой линии;

R_n - коэффициент отстройки, принимаемый равным 4 - 5.

Такой большой коэффициент R_n вынужденно принимается из-за того, что в сетях с изолированной нулевыми точками нейтральную емкостной ток замыкания при перемежающихся замыканиях на землю в 3 - 4 раза превышает ток при устойчивом металлическом замыкании.

Большинство повреждений изоляции обмотки статора приводит к замыканию одной из фаз на корпус ЭД, заземленный в целях безопасности персонала.

Степень опасности замыкания на корпус оценивают по объему выплавленной активной стали статора, возможности быстрого устранения повреждения простыми средствами, вероятности и времени перехода однофазного замыкания в другие, более опасные виды повреждения, например в витковые или многофазные короткие замыкания. Эти факторы зависят от характера протекания процесса, который в свою очередь определяется местом расположения замыкания, видом пробоя, свойствами изоляции, значением и

длительностью протекания тока в месте повреждения, наличием и настройкой устройств компенсации емкостного тока.

Как правило, замыкание фазы на корпус происходит через дугу. На первом этапе своего существования оно является перемежающимся, т.е. имеет характер следующих один за другим пробоев изоляции, сопровождающихся более или менее продолжительным горением заземляющей дуги. В зависимости от места, где произошло замыкание, горение дуги происходит либо в узком канале, проходящем внутри изоляционного покрытия проводников обмотки, либо в воздухе. Первое обычно имеет место быть при замыкании на корпус проводников фазы внутри паза статора. Процесс сопровождается испарением и разложением составляющих изоляционного материала, выделением деионизирующих газов. Чем больше ток замыкания на корпус, тем значительнее разрушение изоляции и электродов в месте повреждения. Погасание дуги вначале происходит при каждом переходе тока через нуль или близко к этому моменту, а затем по мере разогрева электродов при третьем и четвертом переходе через нуль. При обрыве дуги может произойти заплывание проходящего канала. Особенно это характерно для изоляции, основанной на компаундах. Если место вокруг повреждения не загрязнено проводящими продуктами горения дуги, то изоляционная прочность промежутка фаза – корпус может оказаться достаточной для предупреждения следующего пробоя. Проведенные исследования [1] дают основания считать, что такое самоустранение замыкания происходит при токах в дуге, не превышающих 10А в течении первых 0,2с. после возникновения. Затем вероятность самоустранения замыкания становится низкой, в частности, из-за разогрева электродов.

В сетях с изолированной нейтралью на поврежденной фазе повторные зажигания дуги могут повториться каждый полупериод промышленной частоты, а в сетях с компенсацией емкостного тока замыкания на землю, в особенности при близкой резонансной настройке дугогасящих реакторов, повторные зажигания в канале если и происходят, то очень редко, через 5 - 10 полупериодов и более. По мере ухудшения изоляционных свойств канала интервалы между повторными зажиганиями сокращаются и дуга начинает гореть устойчиво и замыкание может перейти в металлическое.

Замыкание на корпус, в лобовых частях и в коробке выводов обмотки статора имеют дуговой характер. Если при замыкании в пазу статора длина дуги практически не меняется, то здесь дуга может растягиваться тепловыми и воздушными потоками. Окружающее дугу пространство быстро ионизируется. Растянувшаяся дуга способна переброситься на расстояния, во много раз превышающие длину пробиваемого воздушного промежутка, повредить изоляцию других частей обмотки статора [2] и привести к витковому или междуфазному короткому замыканию. Горение заземляющей дуги в коробке выводов, как правило, заканчивается (если своевременно не отключить двигатель) междуфазным или однофазным на нейтраль коротким замыканием. Время непрерывного существования дугового замыкания независимо от способа заземления нейтрали может достигать нескольких минут.

В отношении конкретного значения опасного тока в мировой практике нет единого мнения. В [3] за допустимый принимают ток в 1–1,5А, при котором в случае пяти испытаний в одинаковых условиях не происходит сваривания двух листов стали шихтованного сердечника. Ток 20А по одним данным приводит к сильному оплавлению листов стали с образованием капли металла [2], а по другим к настолько незначительному повреждению стали, что легко устраняется зачисткой и подкраской. Принято считать опасным для ЭД ток, больше и равный 5А. При меньших значениях тока оплавление железа за время 0,4 – 4с. маловероятно.

Вместе с тем, длительное (порядка 30–40 минут и более) протекание в месте замыкания токов, даже существенно меньших 4–5А, вызывает значительный местный разогрев, обугливание и разрушения изоляции, что может привести к переходу однофазного замыкания на корпус в витковое замыкание проводников, находящихся в том же пазу, что и поврежденный стержень.

Переходной процесс замыкания на корпус в обмотке статора обычно разделяют на две стадии. Первая заключается в разрядке емкостей поврежденной фазы электродвигателя в сети на землю и перезарядке емкостей между неповрежденными фазами и их емкостей относительно земли. Частота волновых колебаний при замыкании на корпус вблизи линейного вывода фазной обмотки колеблется от 1МГц до 3–5кГц [4]. С перемещением точки замыкания внутрь обмотки частота разрядных колебаний существенно снижается и определяется не волновыми параметрами сети, а значениями емкости и индуктивности поврежденной фазы. Время затухания этой стадии процесса составляет несколько микросекунд. Вторая среднечастотная стадия, включает в себя дозаряд емкостей неповрежденных фаз и компенсацию установившейся составляющей тока замыкания на землю.

Рассмотрим общие соотношения между токами и напряжением в режиме установившегося однофазного замыкания на корпус обмотки статора электродвигателя, работающего в сети с изолированной нейтралью [5, 6]. Схема сети дана на рисунке 4. Пусть замыкание произошло в обмотке фазы А в точке, находящейся на относительном расстоянии b ($0 < b \leq 1$) от нейтрали звезды фазных обмоток. Поврежденное сопротивление имеет емкость каждой фазы по отношению к земле: $C = C_{уд} + C_{д}$, где $C_{л}$ – емкость фазы линии между РУ и ЭД, $C_{д}$ – емкость фазы обмотки статора ЭД. Неповрежденные присоединения представляются одной эквивалентной линией с общей емкостью C' , равной сумме емкостей фазы по отношению к земле всех, исключая поврежденное, элементов сети. С некоторой погрешностью, практически не влияющей на результат, можно считать это сопротивление чисто активным [7]. Считается также, что система ЭДС источника симметрична, а емкости фаз ЭД сосредоточены у его линейных выводов[42].

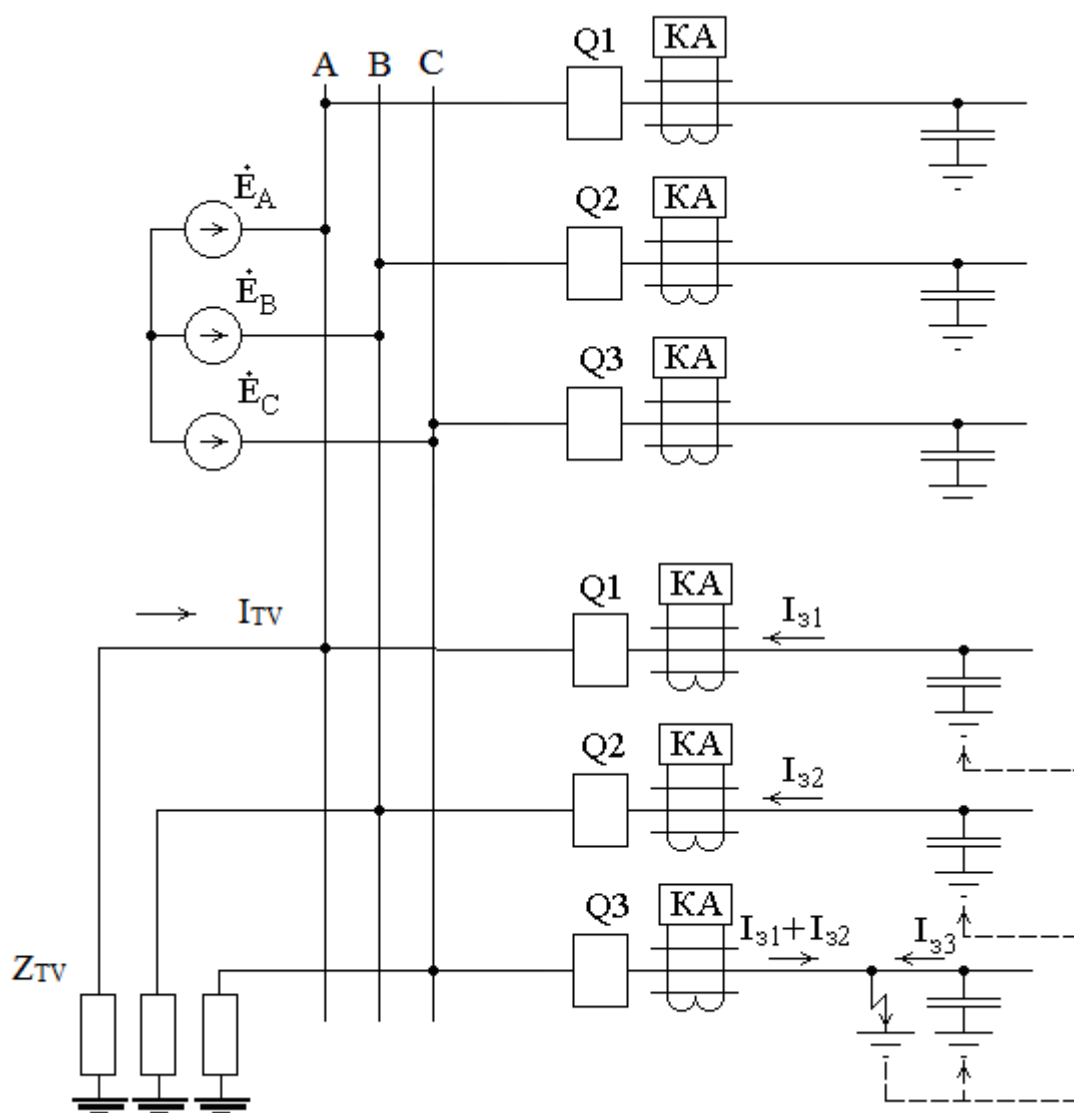


Рисунок 4 – Схема сети с изолированной нейтралью при замыкании фазы А обмотки статора ЭД на корпус

Точка К, имевшая до замыкания в ней на корпус, относительно земли напряжение bU , при замыкании приобретает потенциал земли. Поэтому напряжение фазы А линейного вывода электродвигателя и все сети становится равным:

$$U'_A = U_A - bU_A = U_A(1 - b), \quad (8)$$

Напряжение двух других фаз относительно земли:

$$U'_B = U_B - bU_A, \quad (9)$$

$$U'_C = U_C - bU_A. \quad (10)$$

Под воздействием напряжения , , протекают емкостные токи всех присоединений:

$$\begin{aligned} I_{A-0} &= I_{CлA} - I_{CдA} + I_{C'A} = j\omega C_{л} U'_A + j\omega C_{д} U' + j\omega C' U'_A = \\ &= j\omega C_{\Sigma} U'_A = j\omega C_{\Sigma} (1-b) U_A \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично:

$$I_{B-0} = j\omega C_{\Sigma} U'_B = j\omega C_{\Sigma} (U_B - bU_A). \quad (12)$$

$$I_{C-0} = j\omega C_{\Sigma} U'_C = j\omega C_{\Sigma} (U_C - bU_A). \quad (13)$$

В месте замыкания токи I_{A-0} , I_{B-0} , I_{C-0} складываются, тогда учитывая, что $U'_B + U'_C = (U_B + U_C) - 2bU_A = -U_A(1+2b)$, получаем что, емкостной ток, проходящей в месте повреждения:

$$I_c = j\omega C_{\Sigma} (1-b) U_A - j\omega C_{\Sigma} (1+2b) U_A = -3j\omega C_{\Sigma} U_A. \quad (14)$$

Активная составляющая тока замыкания на корпус I_{3R} , обусловленная протеканием токов в проводимостях (g_{Σ}) и сопротивлениях Z_{TV} трансформатора напряжения, находятся:

$$I_{3R} = -3bU_A \left(g_{\Sigma} + \frac{1}{Z_{TV}} \right), \quad (15)$$

Таким образом, полный ток металлического замыкания в точке К:

$$I_3 = -3bU_A \left(g_{\Sigma} + \frac{1}{Z_{TV}} + j\omega C_{\Sigma} \right). \quad (16)$$

При замыкании на корпус через переходное сопротивление, в частности через сопротивление дуги R_d , напряжение поврежденной фазы в точке К по отношению к земле становится равным $U_{A-0} = -R_d I_3$.

На эту же величину изменяются и напряжения неповрежденных фаз по отношению к земле, и напряжение фазы А сети:

$$U'_{B-0} = U'_B - R_d I_3; \quad (17)$$

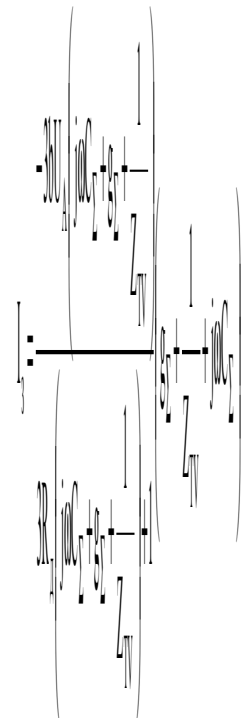
$$U'_{C-0} = U'_C - R_d I_3; \quad (18)$$

$$U'_{A-0} = U'_A - R_d I_3. \quad (19)$$

После несложных преобразований получим, что емкостной ток в сопротивлении дуги равен:

$$I_3 = \frac{3bU_A j\omega C_\Sigma}{1 + 3R_d j\omega C_\Sigma}, \quad (20)$$

С учетом проводимостей утечек и сопротивлений трансформатора напряжения ток замыкания на землю через сопротивление дуги R_d :



$$I_3 = \frac{3bU_A j\omega C_\Sigma}{1 + 3R_d j\omega C_\Sigma}. \quad (21)$$

Напряжение на разомкнутом треугольнике дополнительной обмотки трансформатора напряжения можно определить как сумму:

$$3U_0 = U'_{A-0} + U'_{B-0} + U'_{C-0}, \quad (22)$$

Или, что то же самое, как падение напряжения от тока I'_3 в суммарном сопротивлении $Z_{0\Sigma} = 1/j\omega C_\Sigma + g_\Sigma + 1/Z_{TV}$

Таким образом, из (22) следует:

$$3U_0 = \frac{-3U_A}{3j\omega C_\Sigma + g_\Sigma + \frac{1}{Z_{TV}}} \quad (23)$$

При металлическом замыкании в точки К ($R_d = 0$) выражение (23) становится: $3U_0 = -3bU_A$.

Из (23) можно видеть, что фаза напряжения нулевой последовательности $3U_0$ по отношению к фазному напряжению поврежденной фазы, а так же его значение изменяются в зависимости от R_d . В соответствии с рисунком 5 показана векторная диаграмма напряжения в точке К и в сети для случая $g_\Sigma = 0$ и $Z_{TV} = \infty$. С изменением R_d концы векторов напряжений описывают дуги окружностей. Аналогичная картина имеет место для тока [43, 44].

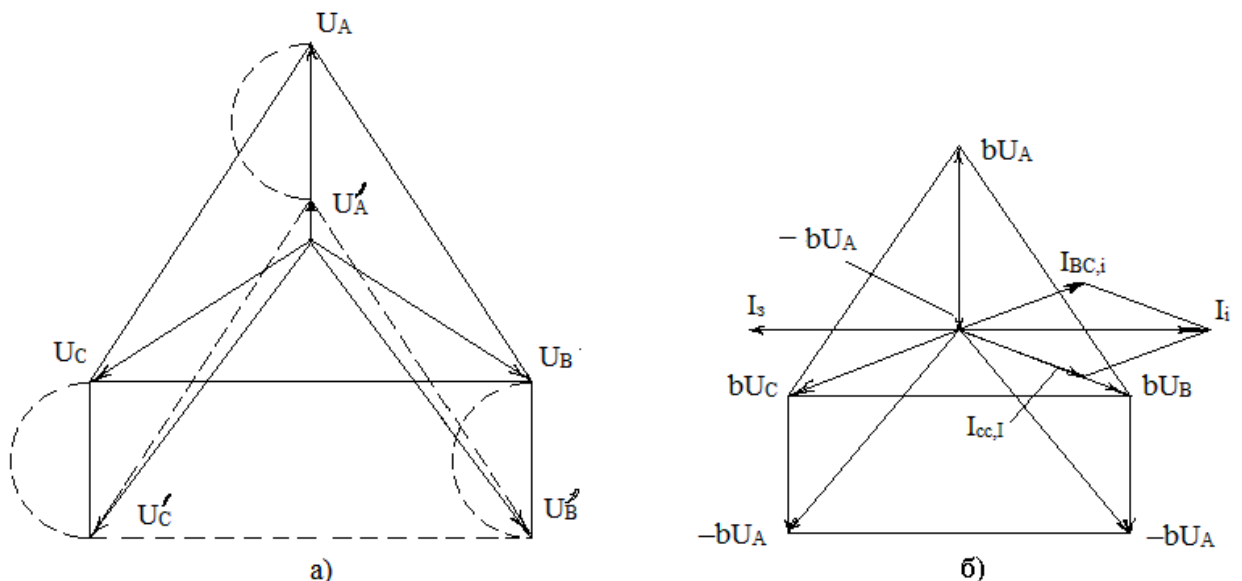


Рисунок 5 – Векторные диаграммы напряжений а) – на выводах ЭД;

б) – в точке К при замыкании фазы обмотки статора на корпус

Те же соотношения можно получить из схемы замещения нулевой последовательности в соответствии с рисунком 6, в которой ЭДС источника принимается равной $E = bU_A$.

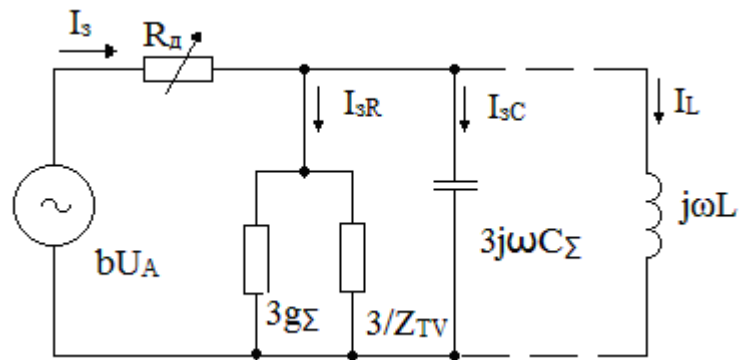


Рисунок 6 – Схема замещения нулевой последовательности при замыкании фазы обмотки статора на корпус

В сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю полный ток замыкания на корпус помимо емкостной и активной составляющих будет содержать и индуктивную, обусловленную включением между нейтралью сети и землей дугогасящего реактора L . Выражение для полного тока нетрудно найти из схемы замещения в соответствии с рисунком 6.

$$I_3 = \frac{-bU_A}{R_d + j\left(3\omega C_\Sigma + 3g_\Sigma + \frac{1}{Z_{TV} + j\omega L}\right)} \quad (24)$$

1.2 Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью

Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью возникают, при междуфазных коротких замыканиях и замыканиях на землю, а так же при коммутационных переключениях. Первое в данной работе не рассматривается.

Конфигурация электроэнергетических систем постоянно меняется из-за происходящих в ней коммутационных переключений. Коммутационные переключения в свою очередь, сопровождаются переходными процессами. Одним из характерных коммутационных переключений является включение

или отключение присоединения к электрической сети с изолированной нейтралью. И если первое как правило не представляет собой опасности, то второе может сопровождаться значительными перенапряжениями. Особенно если коммутация осуществляется вакуумным выключателем.

Моделировать коммутационные переходные процессы можно по-разному. Например, рассчитывать с использованием классических методов изложенных в теоретических основах электротехники (ТОЭ) [8]. Однако, не смотря на внешнюю простоту такой подход не каждому под силу. Дело в том, что расчет в ручную очень трудоемок. А использование для этого ЭВМ требует навыка программирования. Кроме, того подробности моделирования, как правило в публикациях не излагаются [9, 10]. С другой стороны широко известны достаточно простые системы схематического моделирования Electronics Workbench и Micro-Cap, которые так же позволяют моделировать переходные процессы в электрических системах. Однако точность моделирования таких задач электроэнергетики с их помощью известна. В этой работе делается попытка сопоставить результаты моделирования процесса отключения индуктивной нагрузки от сети, оценить их точность и дать рекомендации по поводу применения.

Для простоты рассматривается появление перенапряжений в простой сети, питающей индуктивную нагрузку, которая изображена на рисунке 7,а. Эта сеть содержит источник питания переменного тока с угловой частотой ω и напряжением U , кабельную линию длиной l и сечением S , а так же нагрузку в виде асинхронного двигателя M или трансформатора. Ее эквивалентная схема приведена на рисунке 7,б, где R_k и C_k – активное сопротивление и емкость кабеля; R_m и L_m – активное сопротивление и индуктивность двигателя. Режимов моделирования два. Первый до коммутации, то – есть при замкнутых контактах выключателя QF , а второй после коммутации – при его разомкнутых контактах. До коммутации ток электродвигателя:

$$I_{mm} = U_m / (R_k + R_m + j\omega L_m) = U_m / Z_1 \quad (25)$$

где U_m и I_{mm} - амплитудное значение напряжения питания и тока цепи двигателя.

Мгновенные значения напряжения на емкости и тока в электродвигателе соответственно равны:

$$u_c = U_{mc} \cos \omega t \text{ и } i_M = I_{mm} \cos(\omega t + \varphi_M) \quad (26)$$

где φ_M - сдвиг по фазе тока двигателя относительно питающего напряжения

Таким образом, энергию, запасаемую в элементах схемы с учетом АД в произвольный момент времени определяют так:

$$W_1 = \frac{C_k u_c^2}{2} + \frac{L_M i_M^2}{2} = \frac{C_k U_{mc}^2 \cos^2 \omega t}{2} + \frac{L_M I_{mm}^2 \cos^2(\omega t + \varphi_M)}{2} =$$

$$= \frac{U_{mc}^2}{2} \left(C_k \cos^2 \omega t + \frac{L_M \cos(\omega t + \varphi_M)}{Z_1^2} \right) = \frac{U_{mc}^2}{2} W_1 \quad (27)$$

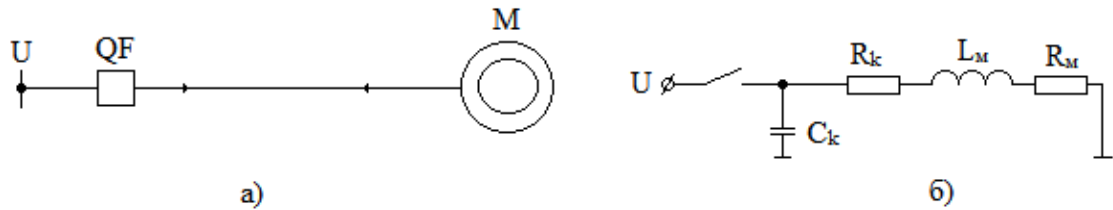


Рисунок 7 – Схема и эквивалентная схема фидера питания двигателя

После коммутации контакты выключателя QF размыкаются, двигатель отключается от источника питания, а в его цепи происходит переходный процесс за счет запасенной энергии W_1 . Электрические параметры этого процесса с учетом [1] определяются следующим образом.

Входное сопротивление цепи электродвигателя после коммутации:

$$Z_{BX}(\omega t) = (R_k + R_M) + j\omega L_k + \frac{1}{j\omega C_k}$$

Характеристическое уравнение получают, заменив в этом выражении $j\omega$ на p и приравняв его к нулю. В результате:

$$Z_{BX}(p) = (R_k + R_M) + pL_k + \frac{1}{pC_k} = 0$$

В итоге:

$$p^2 L_k C_k + p C_k (R_k + R_M) + 1 = 0 \quad (28)$$

Обычно при решении квадратных уравнений принимают $a = L_k C_k$, $b = C_k (R_k + R_M)$, $c = 1$, а дискриминант $d = b^2 - 2a$

Перенапряжение может возникнуть только при колебательном процессе, то есть при $d < 0$. Что соответствует комплексным, попарно сопряженным корням уравнения (28). В этом случае напряжение на емкости после коммутации в соответствии с [8] определяется так:

$$u_{c,cb} = U_{mc,0} e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t) \quad (29)$$

где $\delta = \frac{-b}{2a}$, а $\omega_0 = \frac{\sqrt{d}}{2a}$

$U_{mc,0}$ - амплитуда напряжения на конденсаторе без учета рассеяния энергии в активном сопротивлении кабельного контура;

ω_0 - угловая частота цепи двигателя после коммутации.

Таким образом, мгновенные значения напряжения на емкости и тока в электродвигателе после коммутации:

$$I_{mm,0} = \frac{U_{mc,0}}{R_k + R_m + j\omega_0 L_m + 1/j\omega_0 C_k} = \frac{U_{mc,0}}{Z_{BX,0}} \quad (30)$$

$$I_{m,0} = \frac{u_{c,0}}{R_k + R_m + j\omega_0 L_m + 1/j\omega_0 C_k} = \frac{u_{c,0}}{Z_0} \quad (31)$$

Величину $U_{mc,0}$ определяют следующим образом. Энергия, запасаемая элементами схемы после коммутации без учета потерь в активных сопротивлениях:

$$W_0 = \frac{C_k u_{c,0}^2}{2} + \frac{L_m i_{m,0}^2}{2} = \frac{C_k U_{mc,0}^2 \cos^2 \omega_0 t}{2} + \frac{L_m I_{mm,0}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_{m0})}{2} =$$

$$\frac{U_{mc,0}^2}{2} \left(C_k \cos^2 \omega_0 t + \frac{L_m \cos^2(\omega_0 t + \varphi_{m0})}{Z_0^2} \right) = \frac{U_{mc,0}^2}{2} W_0 \quad (32)$$

где φ_{m0} – сдвиг по фазе тока двигателя относительно напряжения на конденсаторе после коммутации.

Если приравнять энергию, запасаемую контуром до и после коммутации, а затем преобразовать, то амплитуда напряжения на конденсаторе:

$$U_{mc,0} = U_{mc} \sqrt{W/W_0},$$

$$k_U = \frac{U_{mc,0}}{U_{mc}} = \sqrt{W/W_0} \text{ и } k_\omega = \omega_0 / \omega \quad (33)$$

Для определения величины кратности перенапряжения k_U в конкретном случае активные сопротивления R_k и емкость C_k кабеля находят, например по справочнику [11]. Сопротивление R_m двигателя можно просто измерить, а индуктивность и его индуктивное сопротивление найти из соотношения:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} = \frac{U_{ном}^2}{\omega P_m},$$

где $U_{ном}$ и P_m – номинальные значения напряжения и мощности двигателя.

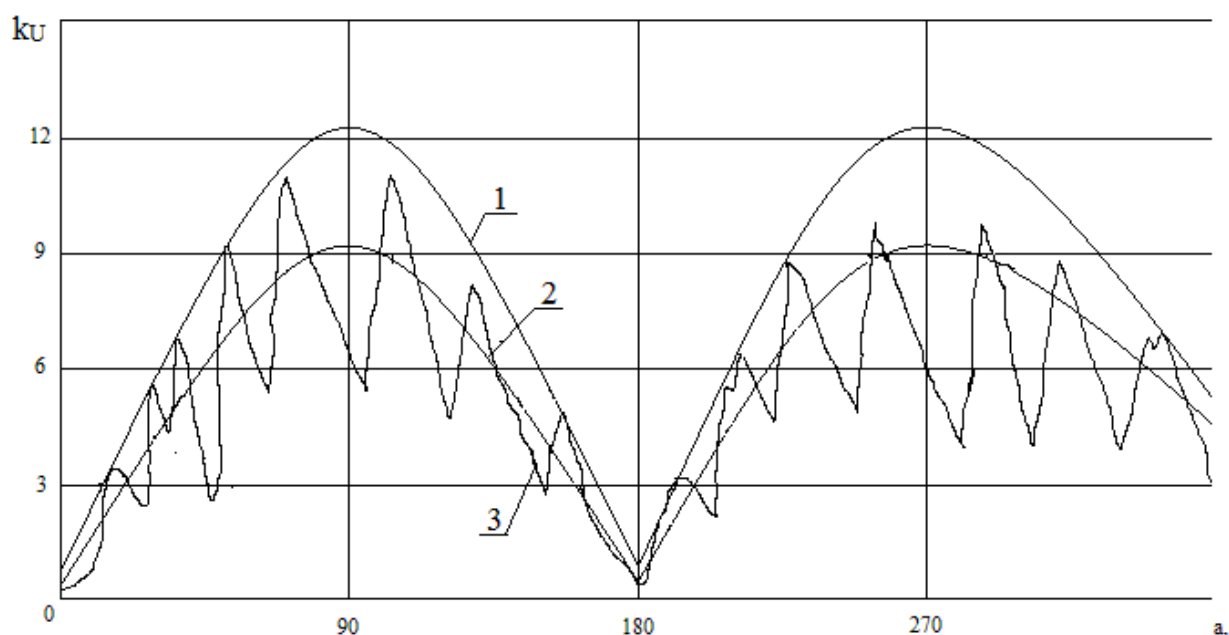


Рисунок 8 – Зависимость кратности перенапряжения в зависимости от ωt

Результаты моделирования зависимости $k_U = f(\omega t)$ с использованием уравнения (33), а так же систем схематического моделирования Electronics Workbench и Micro-Cap в виде кривых 1 - 3 соответственно приведены в соответствии с рисунком 8. Они получены для схемы, у которой $U_m = 100\text{В}$, $R_k + R_m = 100\text{Ом}$, $C_k = 0,075\text{мкФ}$, $L_m = 0,75\text{Гн}$.

Из рисунка 8 видно, что величина k_U в зависимости от угла отключение тока, определяется с помощью Electronics Workbench, изменяется хаотически. Поэтому моделирование переходных коммутационных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с помощью Electronics Workbench не приемлемо и далее не рассматривается[42].

Результаты моделирования максимального значения коэффициента перенапряжения $k_{U,\max}$ и частоты свободных колебаний f_0 по уравнению (33) и с помощью прикладной программы Micro-Cap при различных величинах элементов C_k и L_m схемы приведены в таблице 1

Из таблицы 1 видно, что частота f_0 , определяемая с помощью Micro-Cap, отличается от рассчитанной по уравнению (5) в приведенном диапазоне изменения частот отличается не более чем 10%. В то же время, различие величины k_U в отдельных случаях достигает 660%. Однако как показывает анализ схемы подключения двигателей и трансформаторов, параметры схемы будут близки к тем которые расположены в первой в второй строках. В этом случае погрешность моделирования будет значительно меньше.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Параметры элементов	По уравнению 9		Micro-Cap	
	k_U	$k\omega$	k_U	$k\omega$
$C_k = 0,075\text{мкФ}$ $L_m = 0,75\text{мГн}$	12,35	13,42	9,74	12,84

$C_K = 0,075 \text{ мкФ}$ $L_M = 0,075 \text{ мГн}$	9,76	42,38	3,5	38,68
$C_K = 0,0075 \text{ мкФ}$ $L_M = 0,75 \text{ мГн}$	39	42,44	15,48	38,38
$C_K = 0,0075 \text{ мкФ}$ $L_M = 0,075 \text{ мГн}$	30,79	134,2	4,64	126,58

Полученные выражения для определения кратности перенапряжения характерны для сетей с вакуумными выключателями. Эти выключатели получили широкое распространение в качестве коммутационных устройств сетей 6-35кВ из-за высокой надежности и повышенного ресурса. Именно для них характерен “срез тока”. Под этим явлением понимается способность выключателя практически мгновенно отключать токи до их естественного перехода через нуль. Как правило для вакуумных выключателей “срез тока” происходит при ωt не более 5° [12].

На рисунке 9,а,б приведены результаты моделирования зависимостей $u_c = f(\omega t)$ до и после коммутации по уравнениям (33) с помощью схематического моделирования Micro-Cap при $\omega t = 5^\circ$. Как видно из этих рисунков по кратности перенапряжения и частоты различаются всего на 18% и 4,6% соответственно. Из этого следует, что Micro-Cap позволяет решать задачи этого класса в электроэнергетики с достаточно высокой точностью [12].

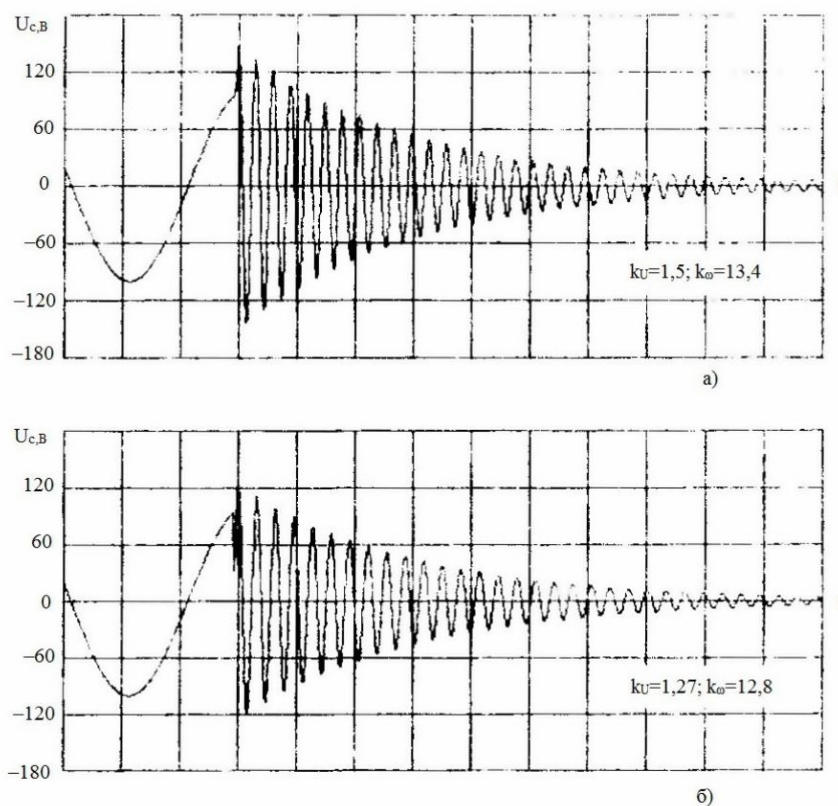


Рисунок 9 – Зависимость кратности перенапряжения от ωt

1.3 Принципы построения защит от однофазных замыканий на землю

1.3.1 Защита от замыканий на землю, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности установившегося режима

В сетях и изолированной нейтралью, замыкание на землю одной фазы не является аварией, так как потребители продолжают нормально работать. Это дает возможность выполнять защиту от замыканий на землю действующей на сигнал. Поэтому в сетях простой конфигурации применяют общее для нескольких объектов, устройство неселективной сигнализации. Оно состоит из трех минимальных реле напряжения, включенных на напряжение фаз относительно земли в соответствии с рисунком 10,а, или из одного максимального реле напряжения, включенного на напряжение нулевой последовательности рисунок 10,б. Устройство сигнализации подключается к трансформаторам напряжения, установленным на шинах.

Длительная работа сети, при замыкании на землю одной фазы на землю недопустима из-за возможности нарушения изоляции в месте повреждения и как следствие перехода однофазного замыкания в многофазное. Возможны случаи двойных замыканий вследствие увеличения в $\sqrt{3}$ напряжений неповрежденных фаз относительно земли. Поэтому в протяженных сетях сложной конфигурации, когда определение поврежденного участка затруднено, наряду с общим устройством неселективной сигнализации необходимо предусматривать селективную защиту на каждом присоединении. Обычно это токовая защита нулевой последовательности.

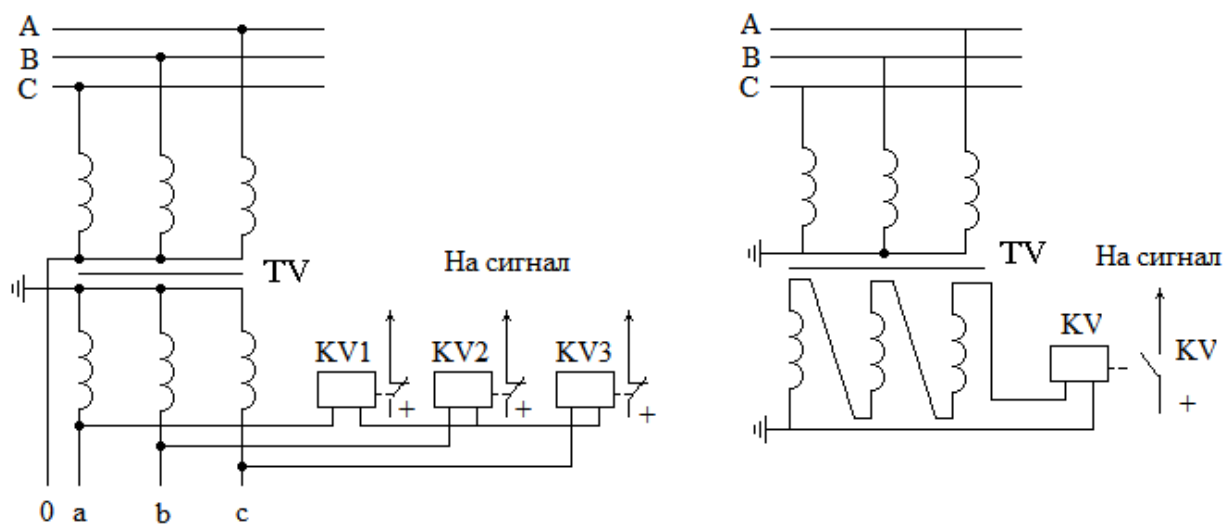


Рисунок 10 – Схемы устройства неселективной сигнализации при замыканиях на землю

Для предотвращения перехода однофазных замыканий в многофазные максимальный ток замыкания на землю в сетях напряжением 35кВ должен быть не более $I_{3\max}^{(1)} < 10\text{А}$; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор при напряжении 3-6кВ, – не более $I_{3\max}^{(1)} < 30\text{А}$, при напряжении 10кВ – не

более $I_{3\max}^{(1)} < 20\text{A}$ и при напряжении 15-20кВ – не более $I_{3\max}^{(1)} < 15\text{A}$ [13]. Если токи больше указанных значений, то применяется их компенсация

Токи замыкания на землю меньше рабочих токов, следовательно защита, выполняется с включением реле на фильтр тока нулевой последовательности. Она приходит в действие, благодаря прохождению по поврежденному участку тока нулевой последовательности $3I_{0(\text{эк})}^{(1)}$, обусловленного емкостью всей электрически связанной сети $C_{0\text{эк}}$ без учета емкости C_{01} поврежденной линии. Защита не должна срабатывать при повреждениях на других присоединениях сети, когда по защищаемой линии проходит ток $3I_{0\text{л}}^{(1)}$ ($3I_{01}^{(1)}$), обусловленный емкостью линии. Для обеспечения не действия защиты ее ток срабатывания выбирают по условию:

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} 3I_{0\text{л}}^{(1)} \quad (34)$$

Коэффициент отстройки определяется броском емкостного тока в момент замыкания. Для защиты с выдержкой времени $k_{\text{отс}} = 4 \dots 5$; без выдержки $k_{\text{отс}} = 2 \dots 2,5$. Без выдержки времени выполняются защиты, действующие на сигнал, защиты линий торфоразработок и других сетей, находящихся в подобных условиях, где при замыкании на землю линии для безопасности должны отключаться без замедления. В таких сетях токи однофазного замыкания на землю обычно не превышают $I_3^{(1)} = 1 \dots 1,5\text{A}$.

Если при возникновении второго замыкания на землю на другой фазе (двойного замыкания на землю) токи значительно возрастают, а напряжения прикосновения достигают недопустимых значений и могут явиться причиной несчастных случаев. Для уменьшения вероятности возникновения опасных двойных замыканий защита от замыканий на землю выполняется с действием на отключение без выдержки времени. Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом $k_{\text{ч}} = 3I_{0\text{эк}}^{(1)} / I_{\text{с.з}}$. Ток $I_{0\text{эт}}^{(1)}$ определяется по режиму с минимально возможным числом включенных линий. Для воздушных линий необходимо $k_{\text{ч}} = 1,5$, а для кабельных $k_{\text{ч}} = 1,25$.

При выполнении защиты в качестве фильтра тока нулевой последовательности обычно используется трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП) ТАЗ в соответствии с рисунком 11. При замыкании сети на землю токи повреждения могут замыкаться как через землю, так и по проводящей оболочке кабеля, в том числе и неповрежденного, что может вызвать неправильное действие защиты. Поэтому воронку и кабель на участке от ТНП до воронки изолируют от земли, а заземляющий провод присоединяют к воронке кабеля и пропускают через отверстие магнитопровода ТНП в направлении кабеля. При таком исполнении токи, проходящие по броне и проводящей оболочке кабеля, компенсируются токами, возвращающимися по заземляющему проводу.

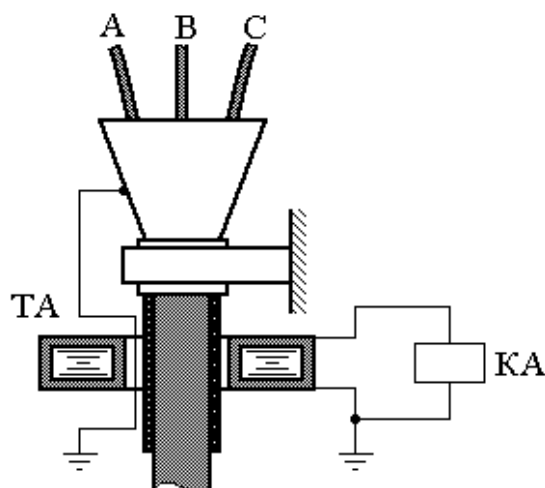


Рисунок 11 – Защита от замыкания на землю с кабельным трансформатором нулевой последовательности

Для выполнения защиты широко используют электромагнитное реле РТ-40/0,2 и полупроводниковое реле РТЗ-50(51). В зависимости от типа ТНП на реле РТ-40/0,2 можно установить первичный минимальный ток срабатывания, равный 6,2А, а на реле РТЗ -50(51) – 3А. [14]

Если в установившемся режиме собственный емкостной ток линии $I_{0л}^{(1)}$ соизмерим с полным током замыкания на землю, то токовую защиту, реагирующую на установившееся значение емкостного тока, осуществить нельзя. В таких случаях применяется направленная защита нулевой последовательности или устройство сигнализации, контролирующее не только значение, но и направление тока замыкания на землю.

Из анализа векторных диаграмм напряжения и тока нулевой последовательности следует, что максимальной чувствительностью обладает реле мощности со внутренним углом $\alpha = \pi/2$. Поэтому для выполнения защиты требуется синусное реле, подключаемое к фильтрам напряжения и тока нулевой последовательности. Защита не имеет измерительного органа тока, поэтому для исключения неправильного ее срабатывания реле направления мощности отстраивается от мощности небаланса, обусловленной погрешностями фильтров.

Необходимо отметить, что так как ток компенсации и емкостной ток в поврежденной линии имеют противоположенные направления, то в перекомпенсированной сети направление тока в поврежденной и не поврежденной линиях одинаковое, поэтому для действия направленной защиты можно использовать только активный ток, который не превышает нескольких процентов от полного тока реактора. Поэтому реле направления мощности должны обладать высокой чувствительностью по углу, а фильтры нулевой последовательности – иметь малые погрешности.

Промышленность выпускает направленную защиту нулевой последовательности от замыканий на землю типа ЗЗП-1 на полупроводниковой элементной базе. Защита служит для селективного отключения защищаемого

При возникновении однофазного замыкания на землю содержание высших гармонических в сети резко увеличивается, причем содержание высших гармонических в токе нулевой последовательности поврежденной линии во много раз больше, чем в токах нулевой последовательности неповрежденных линий.

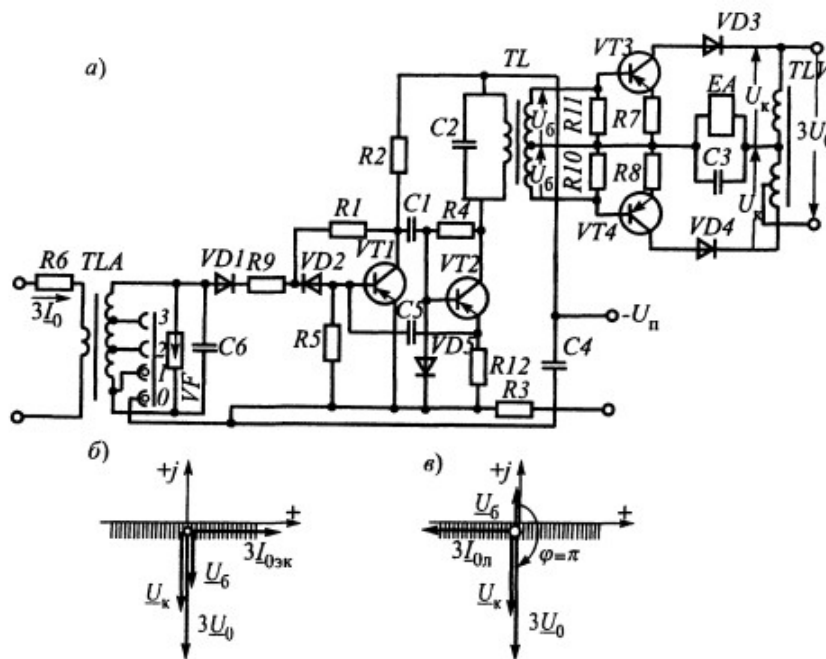


Рисунок 12 – Схемы направленной защиты от замыканий на землю типа ЗЗП-1 (а), и векторные диаграммы (б, в)

Можно выполнить устройство сигнализации, реагирующее на определенную гармоническую, либо на содержание всех высших гармонических в токе нулевой последовательности, что более целесообразно. Разработаны устройства: УСЗ2/2, УСЗ-3М и УСЗ-3, предназначенные для селективной сигнализации замыканий в кабельных сетях 6-10кВ. Они реагируют

на содержание всех высших гармонических в установившемся токе нулевой последовательности. Показанная схема устройства УСЗ-2/2 на рисунок 13 содержит согласующий трансформатор ТЛ, измерительную, логическую и исполнительную части. Для защиты устройства от пиковых напряжений при двойных замыканиях на землю установлен разрядник VF.

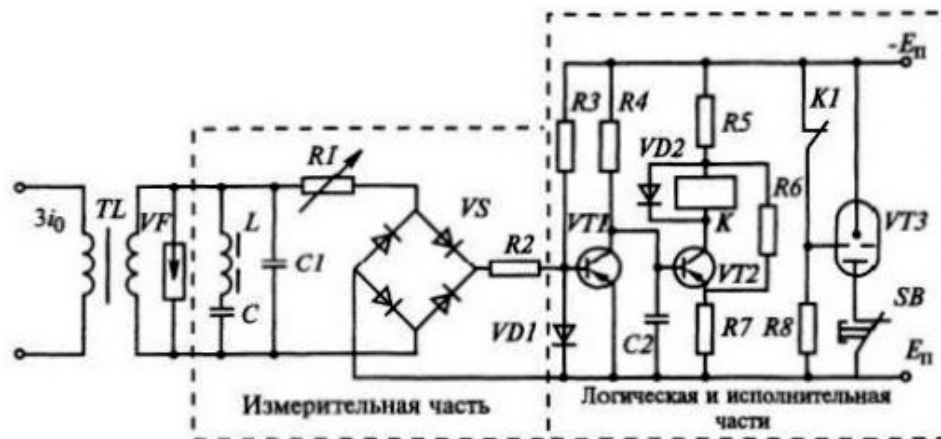


Рисунок 13 – Схема устройства селективной сигнализации при замыкании на землю в кабельных сетях типа УСЗ 2/2

Несколько иную схему имеют устройства УСЗ-3М и УСЗ-3. Конструкция устройства УСЗ-3М предусматривает возможность его применения в качестве стационарного и переносного. Устройство УСЗ-3 применяется совместно с токоизмерительными клещами.

Расчет уставок $I_{уст}$ этих устройств не требуется, уставку устройства УСЗ-2/2 определяют по суммарному емкостному току замыкания на землю $I_3^{(1)}$ без учета компенсации его дугогасящим реактором $I_{уст} \geq I_3^{(1)}$. Уставке соответствует определенный ток срабатывания $I_{с.з.}$. При этом должна быть отстроена от собственного емкостного тока $I_{с.л.}$, это выполняется при $2 \leq I_{с.з.}/I_{с.л.} \leq 3$. Порядок расчета дан в [14, 15]

В переходном процессе при ОЗЗ, как отмечалось выше, амплитуда первой полуволны свободной составляющей тока нулевой последовательности в поврежденной линии в несколько раз превышает значение амплитуд токов неповрежденных линий. Это позволяет выполнять защиты, основанные на контроле этого тока.

В свое время были предложены защиты, использующие тиратронное и электромеханическое реле [16, 17]. Проблема состоит в том, что необходимы быстродействующие реле, способные зафиксировать кратковременные импульсы переходного тока. Недостаток такой защиты состоит в том, что она не реагирует на установившееся токи повреждения. В связи с этим невозможно повторное срабатывания реле, возвращенного в начальное положение при проверки наличия на линии, на которой срабатывает защита устойчивого повреждения. Кроме того, вызывает затруднение расчет токов переходного процесса, которые зависят от момента возникновения повреждения, переходного сопротивления, в частности сопротивления дуги.

Ток срабатывания защиты рекомендуется выбирать по условию отстройки от собственного емкостного тока присоединения [16]. Промышленный выпуск таких защит отсутствует, и распространения они не получили.

Не получили распространения защиты: сравнивающие амплитуды значений свободных составляющих токов переходного процесса всех присоединений секции или системы шин; защита, реагирующая на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса; импульсная направленная защита нулевой последовательности типа ИЗС; устройство защиты УЗС-01 и другие аналогичные реле [18].

1.3.2 Оценка защит от однофазных замыканий на землю и пути их совершенствования.

Оценка защит. Устройство общей неселективной сигнализации является общим для всех присоединений сети и срабатывает при повреждении на любом из них. Для выявления поврежденного элемента необходимо поочередное отключение всех присоединений данного напряжения. В этом недостаток устройства, и потому кроме него предусматривают также селективные защиты от замыкания на землю.

Токовая защита нулевой последовательности. Для выполнения защиты используют реле РТ-40/0,2, РТХ-50 и РТЗ-51. Защиту устанавливают в сетях с изолированной нейтралью. Ее селективность обеспечивается отстройкой тока срабатывания от собственного емкостного тока защищаемой линии $I_{c.l} (3I_{0.l}^{(1)})$. При этом коэффициент отстройки $k_{отс}$ для защиты без выдержки времени принимается равным 4...5, а для защиты с выдержкой времени – 2...2,5.

Можно показать, что для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности $k_{\chi} = 1,5$ в худшем случае ($k_{отс} = 5$) минимальный суммарный емкостной ток $I_{\Sigma c min}$ должен превышать собственный емкостной ток защищаемой линии $I_{c.l}$ не менее чем в 8,5 раз. Это требование не всегда выполняется. Для более совершенного реле РТЗ-51 соотношение между $I_{\Sigma c min}$ и $I_{c.l}$ должно быть не менее 2,5. В [18] приведены результаты анализа недостатков многих комплектов токовых защит. Из этого анализа следует, что реле РТ-40/0,2 не обеспечивает селективность, а реле РТЗ-50 ненадежно из-за ложного срабатывания при перерыве питания.

Направления защита нулевой последовательности. Наибольшее распространение получила защита ЗЗП-1. Она устанавливается в сетях с изолированной нейтралью. В процессе продолжительной эксплуатации выявлены ее недостатки, которые сводятся в основном к излишним срабатываниям при перемежающихся дуговых замыканиях, а так же при отключении однофазных замыканий на землю.

В эти режимах из-за различия переходных процессов в цепях тока и цепях напряжения реле кратковременно искажаются фазовые соотношения между напряжением и током в реле и оно излишне срабатывает. Имеются предложения

по устранению этого недостатка [18]. Более совершенным является реле ЗЗН, которое начинает вытеснять реле ЗЗП-1.

Токовая защита, реагирующая на высшие гармонические в установившемся токе нулевой последовательности. Защита выполняется с помощью устройств УСЗ-2/2, УСЗ-3М и УСЗ-3 и используется в сетях с полной компенсацией емкостного тока.

Недостаток устройства УСЗ-2/2 – излишнее срабатывания, вызванные прежде всего невозможностью правильно выбрать уставку защиты, которая зависит от ряда факторов, изменяющихся в процессе эксплуатации. В этом отношении УСЗ-3 и УСЗ-3М более селективны.

Однако процесс отыскания поврежденного присоединения с помощью этих устройств занимает много времени. Поэтому желательно его автоматизировать.

Защита, реагирующая на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса. На этом принципе около сорока лет назад разработана защита ИЗС. По сравнению с другими устройствами защиты от замыканий на землю защита ИЗС оказалась наименее удовлетворяющей основным требованиям чувствительности, селективности, надежности. При разработке этого реле, очевидно, не было учтено все многообразие переходного процесса.

Из сказанного следует, что ни одно из рассматриваемых устройств защиты не удовлетворяет в полной мере требованиям эксплуатации. Объяснить это можно, по крайней мере, двумя причинами [18]:

Сложностью и нестабильностью процессов при замыкании на землю;

Изменением конфигурации сетей, режимов и нагрузок в процессе эксплуатации.

Совершенствования защит от ОЗЗ осуществляется на основе интегральных микросхем и микропроцессорной элементной базе (цифровые реле), а также использования некоторых новых принципов.

В течении последних десяти лет в этом направлении проводили работы научно-исследовательские институты и некоторые высшие учебные заведения [18, 19-22]

При этом разрабатывались не только индивидуальные, но и групповые защиты от замыканий на землю. Такой, например, является направленная защита на 16 присоединений, действующая при переходных процессах. Она разработана Ивановским государственным энергетическим университетом. Здесь же предложено индивидуальное устройство, сравнивающее знаки высших гармоник производной напряжения нулевой последовательности dU_0/dt и тока нулевой последовательности I_0 переходного процесса и установившегося режима. Такое устройство может срабатывать как при кратковременных, так и при устойчивых замыканиях на землю. В связи с тем, что при замыканиях на землю по поврежденному элементу проходит наибольшей емкостной ток, было предложено защиту от ОЗЗ выполнять групповой, основу которой составляет реле тока с обратной зависимостью от тока временной характеристики [22]. Выполнялись работы по обоснованию резистивного заземления нейтрали. Было

показано, что в этом случае не только снижается вероятность возникновения перенапряжений и двойных замыканий на землю, но и появляется возможность использовать реле ОТ-40/0,2 и РТЗ для выполнения вполне удовлетворительной защиты.

Продолжались исследования гармонического состава токов и напряжений нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях на землю [23]. Было показано, что защиту в компенсированных сетях целесообразно выполнять на принципе измерения амплитуд гармоник тока нулевой последовательности при частотах от 5 до 30Гц.

Однако при устойчивых ОЗЗ такие составляющие в токе отсутствуют. Потому предлагается для действия защиты в этом случае производить искусственное наложение контрольного тока с частотой 25Гц с помощью специального источника контрольного тока [22].

Необходимо отметить, что принцип искусственного наложения тока при выполнении защиты от ОЗЗ в нашей стране начал применяться еще в шестидесятые годы прошлого века [24]. Однако в этих защитах используется контрольный ток с частотой 100Гц.

1.4 Фильтры тока и напряжения нулевой последовательности

Напряжения или токи фаз трехфазной симметричной системы равны по величине и сдвинуты на 120° . Если это не так, то система несимметрична. Пример векторных диаграмм напряжений $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ симметричной и несимметричных систем приведен на рисунках 14,а и 14,б. В соответствии с [3, 8] любую несимметричную трехфазную систему можно разложить на симметричные составляющие в виде прямой, обратной и нулевой последовательности. Прямая, обратная и нулевая последовательности несимметричной системы напряжений приведены на рисунке 15.

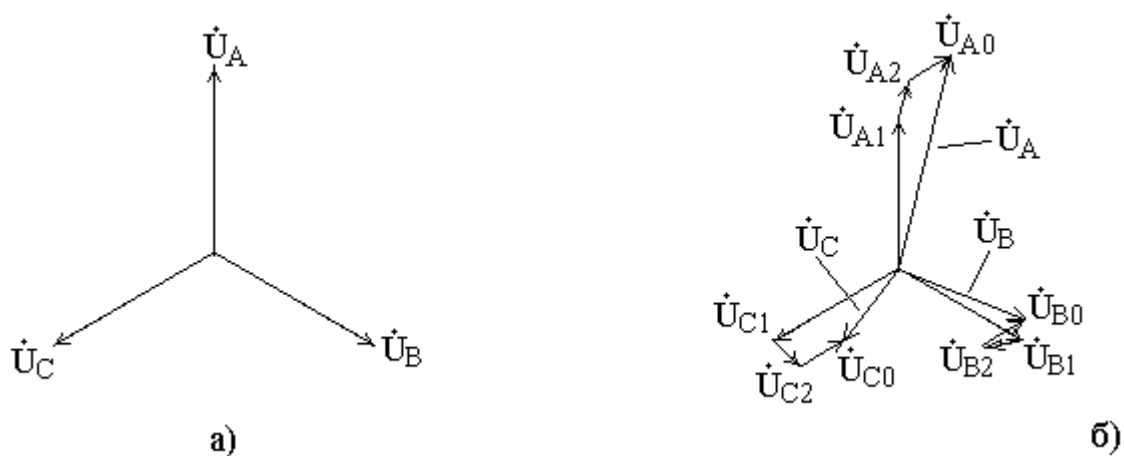


Рисунок 14 – Симметричная и несимметричная системы векторов напряжений

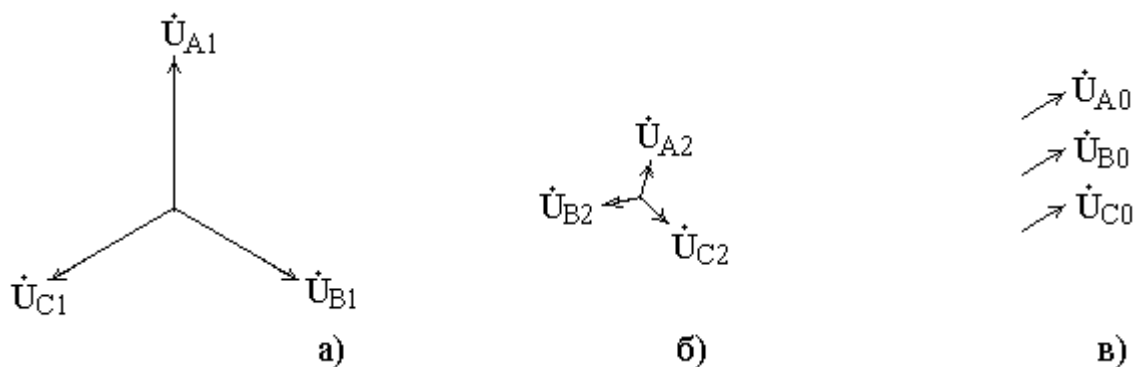


Рисунок 15 – Симметричные составляющие а) прямой; б) обратной; в) нулевой последовательностей

Симметричную систему напряжений прямой последовательности на рисунке 15,а образуют три одинаковых по модулю вектора $U_{A1} \angle 0^\circ$, $U_{B1} \angle 120^\circ$ и $U_{C1} \angle 240^\circ$. Симметричная система напряжений обратной последовательности на рисунке 14,б образована равными по модулю векторами $U_{A2} \angle \alpha_2 + 0^\circ$, $U_{B2} \angle \alpha_2 + 240^\circ$ и $U_{C2} \angle \alpha_2 + 120^\circ$, где α_2 - угол сдвига вектора $U_{A2} \angle \alpha_1 + 0^\circ$ относительно $U_{A1} \angle 0^\circ$. Система напряжений нулевой последовательности на рисунке 14,в состоит из трех векторов одинаковых по модулю $U_{A0} \angle \alpha_0$, $U_{B0} \angle \alpha_0$ и $U_{C0} \angle \alpha_0$, где α_0 - угол сдвига вектора $U_{A2} \angle \alpha_1 + 0^\circ$ относительно $U_{A1} \angle 0^\circ$.

В результате, фазные напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}.\end{aligned}\tag{35}$$

Представление несимметричной трехфазной системы токов в виде симметричных составляющих осуществляется аналогично.

Определение токов и напряжений несимметричных систем для каждого конкретного случая определяют по методам, изложенным, например, в [27].

В соответствии с [25, 26] режим замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью характерен появлением токов и напряжений нулевой последовательности. Традиционно для их выделения используют фильтры тока или напряжения нулевой последовательности.

Фильтры напряжения нулевой последовательности (ФННП) достаточно просты. В высоковольтных сетях наибольшее распространение получили фильтры нулевой последовательности, выполняемые на базе измерительных трансформаторов напряжения типа ЗНОМ или НТМИ. При реализации такого фильтра первичные обмотки этих трансформаторов соединяются в «звезду», а одна из вторичных обмоток в схему разомкнутого «треугольника» как показано на рисунке 16.

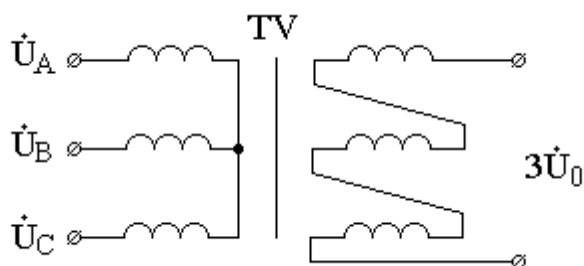


Рисунок 16 – Схема разомкнутого треугольника

Напряжение на выходе разомкнутого «треугольника» равно утроенному напряжению нулевой последовательности, так как с учетом рисунка 15.

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{C1} &= 0, \\ \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{C2} &= 0, \\ \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{C0} &= 3\dot{U}_0.\end{aligned}$$

В низковольтных сетях в качестве ФННП возможно использование конденсаторов или диодов, соединяемых по схемам (рисунок 17).

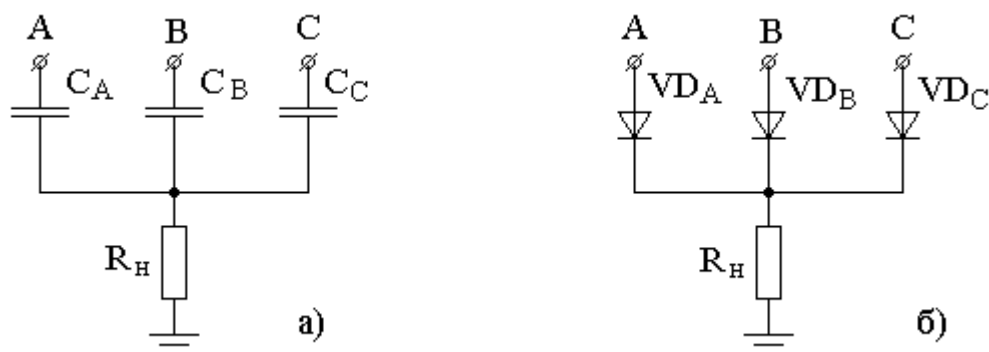


Рисунок 17 – Схема ФННП на конденсаторах и диодах

Фильтр тока нулевой последовательности осуществляют выделением из токов фаз тока нулевой последовательности, характеризующего наличие однофазного замыкания на землю.

Традиционно фильтр тока нулевой выполняют из трех трансформаторов тока ТА, как показано на рисунке 18,а. Их вторичные обмотки включены параллельно, вследствие чего в реле КА проходит только ток нулевой последовательности:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0$$

При этом сумма токов прямой и обратной последовательностей в реле:

$$\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = 0 \text{ и } \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = 0.$$

Однако такие фильтры используют вынужденно, так как они не позволяют строить защиты в сетях с малыми токами замыкания на землю. Это вызвано тем, что как правило, токи однофазного замыкания на землю значительно меньше токов нагрузки в сети, по которым выбираются трансформаторы тока. При этом трансформаторы тока для релейной защиты могут иметь погрешность до 10%. То есть токи нулевой последовательности соизмеримы с токами погрешности.

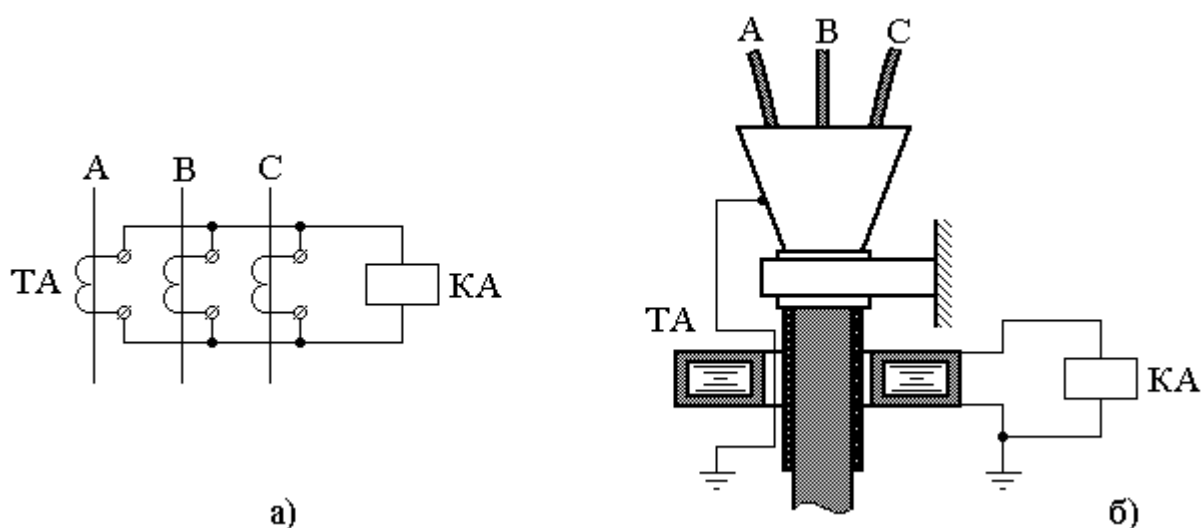


Рисунок 18 – Кабельный трансформатор тока с кольцевым сердечником

Чаще в качестве фильтром тока нулевой последовательности используют кабельный трансформатор тока нулевой последовательности с кольцевым сердечником, который показан на рисунке 18,б. В этом сердечнике суммируются магнитные потоки от токов в проводниках фаз кабеля, а результирующий поток сердечника индуцирует в обмотке трансформатора тока ЭДС и ток нулевой последовательности.

Включение измерительных приборов и реле в установках высокого напряжения переменного тока большой величины производится обычно через измерительные трансформаторы напряжения (ТВ) и тока (ТА) [1, 2, 27 – 31]. Назначение измерительных трансформаторов состоит в том, чтобы изолировать измерительные приборы и реле от цепей высокого напряжения и уменьшить напряжение (тысяч вольт) и токи (сотни тысяч ампер) до величин, удобных для измерения. Трансформаторы напряжения обычно изготавливаются с номинальным вторичным напряжением 100В, а трансформаторы тока – с номинальным вторичным напряжением 5 и 1А.

Устройство и принцип действия. Принципиальным отличием трансформатора тока (ТТ) от трансформатора напряжения является то, что его первичная обмотка включается последовательно в цепь измеряемого тока и, следовательно, через нее проходит весь ток нагрузки или КЗ. Этот ток является для ТТ принужденным и проходит по его первичной обмотке независимо от

состояния вторичной обмотки, т.е. от того, замкнута ли она на нагрузку, закорочена или разомкнута [27, 29 – 31, 32].

Устройство и схема включения ТТ показаны на рисунке 19. Так же как и ТН, ТТ состоит из стального сердечника С и двух обмоток: первичной (с числом витков w_1) и вторичной (с числом витков w_2). Часто ТТ изготавливают с двумя и более сердечниками. В таких конструкциях первичная обмотка является общей для всех сердечников (рисунке 19,б). Первичная обмотка, выполняется толстым проводом, имеет несколько витков и включается последовательно в цепь того элемента, в котором производится измерения тока, или защита которого осуществляется.

К вторичной обмотке, выполняемой проводом меньшего сечения и имеющей большое число витков, подключаются последовательно соединенные реле и приборы.

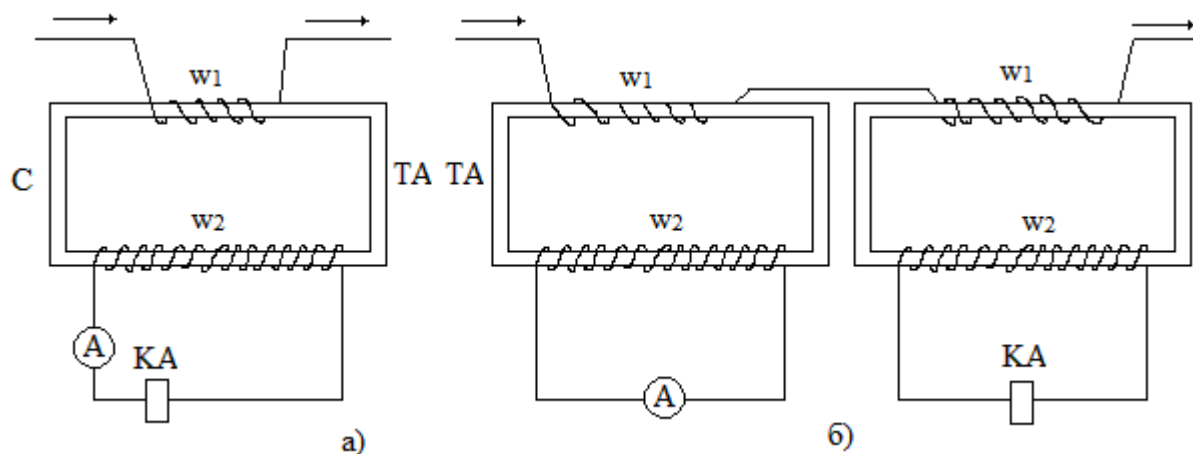


Рисунок 19 – Устройство и схема включения трансформаторов тока:
а) с одним сердечником; б) с двумя сердечниками

Ток проходящей 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, индуцирует в ней вторичный ток I_2 , а так же создающий в сердечнике магнитный поток Φ_2 , но направленный противоположно магнитному потоку Φ_1 . Результирующий магнитный поток в сердечнике равен их разности.

Магнитный поток зависит не только от значения создающего его тока, но и от количества витков обмотки, по которой этот ток проходит, по этому справедливо следующее равенство:

$$I_{\text{нам}} w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2 \quad (36)$$

где $I_{\text{нам}}$ – ток намагничивания, являющийся частью первичного тока, обеспечивает результирующий магнитный поток в сердечнике

ω_1 , ω_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение витков $w_1/w_2 = K_1$ называется коэффициентом информации.

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 $I_{ном} = 0$.

Тогда:

$$\frac{I_1}{I_2} = K_1.$$

Определение вторичного тока по известному первичному и наоборот производится по номинальным коэффициентам

Таблица 2 – Допустимые погрешности трансформатора тока

Наименование класса точности	Допустимая погрешность в токе, %	Допустимая погрешность по углу	Область применения
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Точные лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 40	Приборы учета электроэнергии
1	± 1	± 80	Все типы защит и щитовые приборы
3	± 3	Не нормируется	Токовые защиты и амперметры
Д	Не нормируется		Специальные для дифференциальной защиты

Погрешности ТТ. Коэффициент трансформации ТТ так же, как и у ТН, не является строго постоянной величиной и может из-за погрешностей отличаться от номинального значения. Погрешности ТТ зависят главным образом от кратности первичного тока по отношению к номинальному току первичной обмотки и от нагрузки, подключенной ко вторичной обмотке. Классификация ТТ по допустимым погрешностям приведена в таблице 2.

Допустимые погрешности, приведенные в таблице 2 соответствуют нагрузкам вторичной обмотки, не превышающим номинальную, при вторичном токе, не превышающем 120% номинального.

Трансформаторы напряжения по принципу действия и конструктивному выполнению аналогичны силовому трансформатору. Они состоят из стального сердечника (магнитопровода) С, собранного из тонких пластин трансформаторной стали, и двух или нескольких обмоток – первичной и вторичной, изолированных друг от друга и от сердечника. Схема трансформатора напряжения TV Как показана на рисунке 20.

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), подключается параллельно реле и измерительные приборы. Под воздействием напряжения сети по первичной обмотке проходит ток, создающей в сердечнике переменный магнитный поток Φ , который пересекая ветки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E , которая при разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход TV) равна напряжению на ее зажимах U_{2x} .

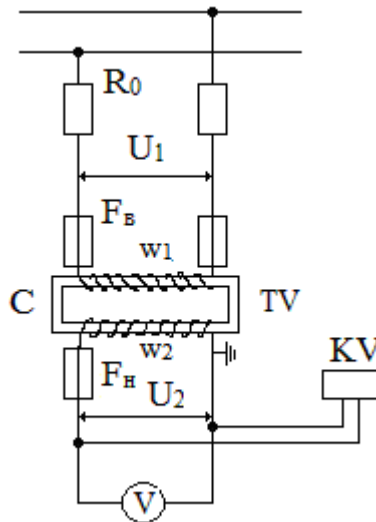


Рисунок 20 – Устройство и схема включения трансформатора напряжения

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 :

Отношение чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации и обозначается K_U :

Если к вторичной обмотке ТН подключена нагрузка в виде реле и приборов, то напряжение на ее зажимах U_2 будет меньше ЭДС на величину падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки. Однако поскольку это падения напряжения не велико, оно не учитывается

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 – а, конец – х; начало дополнительной вторичной обмотки – а_д, конец – х_д.

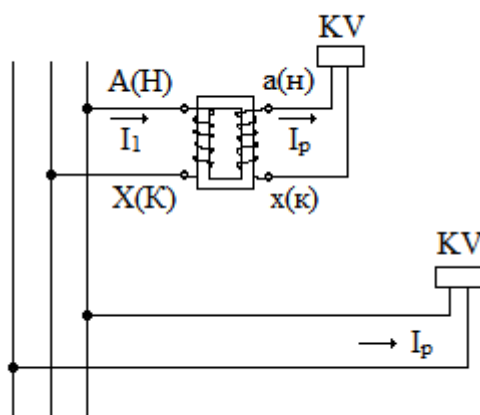


Рисунок 21 – Маркировка (обозначение) выводов обмоток трансформатора напряжения

При включении однофазных ТН на фазные напряжения начала первичных обмоток присоединяются к фазам, а концы соединяются вместе, образуя нулевую точку. При включении ТН на междуфазные напряжения начала их первичных обмоток подключаются к начальным фазам в порядке их электрического чередования. Так, например на рисунке 22,б показана схема подключения двух ТН на междуфазные напряжения АВ и ВС.

При маркировке выводов вторичных обмоток трансформатора напряжения за начало *a* принимается тот вывод, из которого ток выходит в то время, когда в первичной обмотке ток приходит от начала *A* к концу *X*. Иными словами, если на первичной стороне ток входит в начало обмотки *A*, то однополярным выводом, т.е. началом вторичной обмотки *a*, будет ее вывод, из которого в этот момент ток выходит. При маркировке обмоток по такому правилу направление тока в реле, как показано на рисунке 21, при включении реле через ТН останется таким же, как и при включении реле непосредственно в сеть.

Трансформаторы напряжения бывают трехфазные и однофазные. Последние в зависимости от назначения соединяются между собой в различные схемы. На рисунках 22 и 23 приведены основные схемы соединения обмоток однофазных ТН.

На рисунке 22,а дана схема включения одного ТН на междуфазное напряжение. Эта схема применяется, когда для защиты или измерений достаточно одного междуфазного напряжения.

На рисунке 22,б приведена схема соединения двух ТН в открытый треугольник, или неполную звезду. Эта схема, получившая широкое распространение, применяется, когда для защиты или измерений нужно иметь два или три междуфазных напряжения.

На рисунке 22,в приведена схема соединения трех ТН в звезду. Эта схема получила так широкое распространение и применяется, когда для защиты или измерений нужны фазные напряжения или же фазные и междуфазные напряжения одновременно.

На рисунки 22,г приведена схема соединения трех ТН треугольник – звезда. Эта схема обеспечивает повышенное напряжение на вторичной стороне до $U = \sqrt{3}U_{\text{НОМ}} = 173\text{В}$.

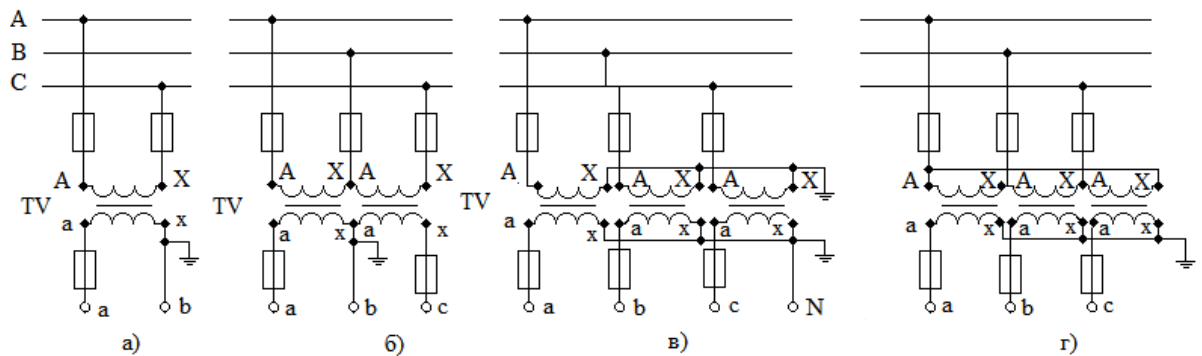


Рисунок 22 – Схемы соединения обмоток однофазных трансформаторов напряжения с одной вторичной обмоткой

При включении первичных обмоток ТН на фазные напряжения они соединяются в звезду, нулевая точка которой обязательно соединяется с землей (заземляется), как показано на рисунках 22,в, 23. 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.

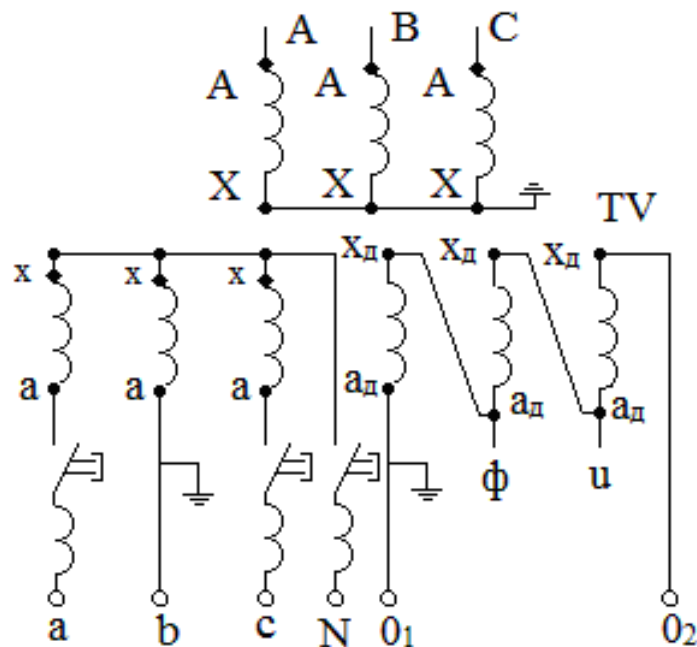


Рисунок 23 – Схема соединений обмоток трансформатора напряжения с двумя вторичными обмотками

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 22,в,г) или один из фазных проводов (рисунках 22,а,б, 23). В провода, соединяющих точку заземления с обмотками ТН, не должно быть коммутационных и защитных аппаратов (рубильников, переключателей, автоматических выключателей и т.д.).

Трансформаторы напряжения имеют две погрешности:

погрешность в напряжении (или в коэффициенте трансформации), под которой понимается отклонение действительного коэффициента трансформации от номинального.

погрешность по углу, под которой понимается угол сдвига вторичного напряжения относительно первичного.

В зависимости от погрешностей ТН подразделяются на классы точности. Допустимые погрешности в зависимости от класса точности приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Допустимые погрешности ТН

Наименование класса точности	Допустимая погрешность в напряжении, %	Допустимая погрешность по углу	Область применения
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Точные лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 20	Приборы учета электроэнергии
1	± 1	± 40	Щитовые приборы
3	± 3	Не нормируется	Контроль изоляции и другие виды сигнализации. Цепи релейных защит

Один и тот же ТН в зависимости от нагрузки, подключенной к его вторичной обмотке, может работать с различным классом точности. Поэтому в каталогах и паспортах на ТН указывается два значения мощности: номинальная мощность в вольт – амперах, с которой ТН может работать в гарантированном классе точности, и предельная мощность, с которой ТН может работать с допустимым нагревом обмоток. Предельная мощность ТН в несколько раз превышает номинальную. Так, у ТН типа НОМ – 6 с коэффициентом трансформации 6000/100 для класса точности 1 номинальная мощность составляет 50ВА, а предельная – 300ВА.

1.5 Реагирующие органы защит

В схемах релейной защиты и электрической автоматики применяются электромеханические реле, реле на полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) и реле с использованием насыщающихся магнитных систем. Значительное распространение пока имеют электромеханические реле.

Однако наличие таких недостатков электромеханических реле, как большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, трудности в обеспечении надежной работы контактов побудили к поискам более совершенных принципов выполнения реле. Новые принципы исполнения реле с помощью полупроводниковых приборов позволяют существенно улучшить параметры и характеристики реле и перейти полностью или частично на бесконтактные схемы защит. Постепенно новые принципы выполнения реле находят все большее практическое применение.

Реле, реагирующие на электрические величины, можно подразделить на три группы:

1. реле, реагирующие на одну электрическую величину: ток или напряжение;
2. реле, реагирующие на две электрические величины: ток и напряжение сети или два напряжения, каждое из которых является линейной функцией тока и напряжения сети;
3. реле, реагирующие на три или больше электрические величины, например: три тока и три напряжения сети, или несколько напряжений, представляющих линейные функции токов и напряжений сети.

К первой группе относятся реле тока и реле напряжения. Ко второй принадлежат однофазные реле: мощности, сопротивления и некоторые другие. К третьей относятся трехфазные реле мощности, многофазные реле сопротивления и другие устройства.

Вторичные реле тока, напряжения и мощности косвенного действия.

Принципиальная схема включения вторичного реле максимального тока косвенного действия на оперативном постоянном токе приведена на рисунке 24. В отличие от реле прямого действия реле косвенного действия не производят сами отключения выключателя. Для этой цели в приводе имеется специальный электромагнит 2, а реле 1 имеет вместо бойка контакты, которыми оно при срабатывании замыкает цепь обмотки отключающего электромагнита на аккумуляторную батарею, являющуюся источником оперативного тока.

Вторичные реле производят незначительную работу и поэтому могут быть выполнены весьма точными и чувствительными при небольших размерах. Кроме того, их легко соединять в различные схемы. Благодаря этим положительным свойствам вторичные реле косвенного действия являются основным типом реле и получили наиболее широкое применение для релейной защиты и автоматики.

Недостатком реле косвенного действия является необходимость источника оперативного тока и прокладки контрольного кабеля для соединения реле с источником оперативного тока и с приводом выключателя.

Электромагнитное реле мгновенного действия типов РТ-40 выполнены на электромагнитной системе с поперечным движением якоря. Принцип устройства реле РТ-40, показан на рисунке 25, а конструктивное выполнение - на рисунке 26 [2, 13]

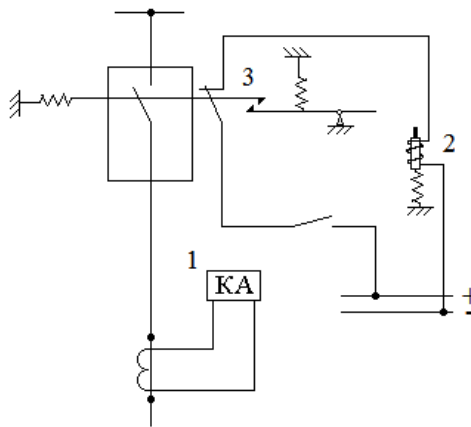


Рисунок 24 – Принципиальная схема включения вторичного реле максимального тока косвенного действия на оперативном постоянном токе

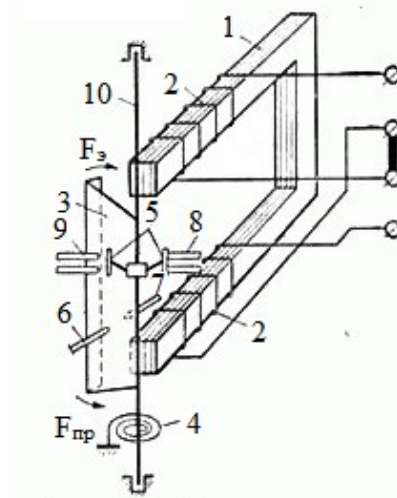


Рисунок 25 – Принцип устройства электромагнитного реле тока РТ-40

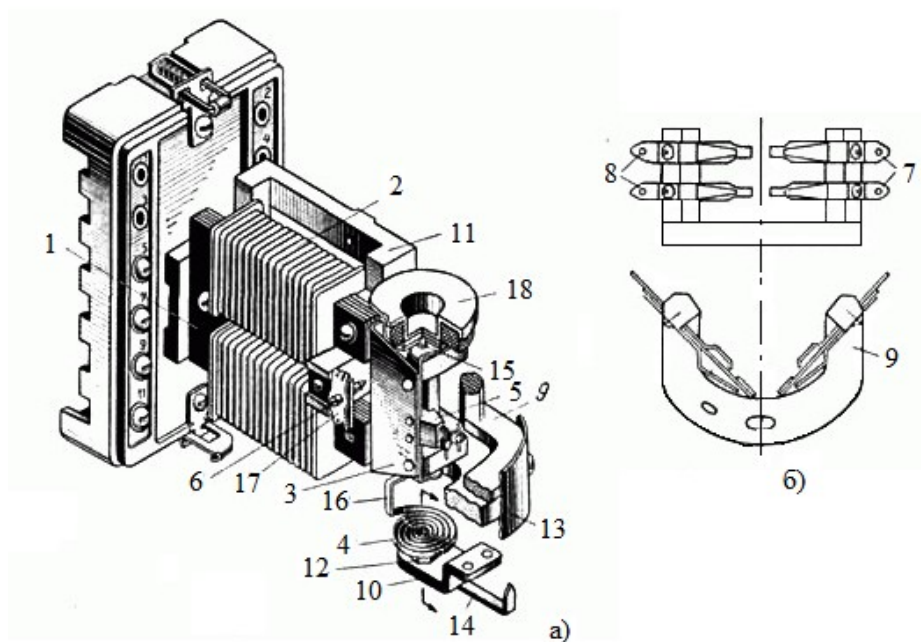


Рисунок 26 – Конструктивное выполнение реле типов РТ-40

Реле состоит из следующих основных частей (деталей): электромагнита 1 с обмоткой 2, состоящей из двух катушек, расположенных на верхнем и нижнем стрелках электромагнита; стального якоря 3, жестко укрепленного на оси 10; подвижных контактных мостиков 5, укрепленных на якоре с помощью изоляционной колодки; спиральной противодействующей пружины 4, связанной внутренним концом с осью якоря; неподвижных контактов 7,8 и упорных витков 6, ограничивающих ход якоря.

На якорь действует электромагнитная сила F_z и противоположенная по направлению механическая сила пружины $F_{пр}$. Якорь притягивается к электромагниту, и реле, срабатывая, размыкает контакты 7 и замыкает контакты 8 при токе реле, при котором $F_z > F_{пр}$.

При прохождении по обмоткам электромагнита тока электромагнит стремится притянуть якорь к полюсам, т.е. повернуть его вместе с осью по часовой стрелки. Этому препятствует спиральная пружина. Усилие, воздействующее на якорь от электромагнита (электромагнитный момент), зависит от числа витков обмотки, значения тока в обмотке и угла поворота якоря, а усилие от пружины, угла и поворота якоря.

При отсутствии тока в обмотки ли его малом значении якорь под воздействием пружины находится в крайнем левом положении. С увеличением тока электромагнитный момент возрастает и, когда он превысит противодействующий момент пружины, якорь втягивается под полюсы и поворачивает ось с подвижным контактным мостиком, который при этом замыкает неподвижные контакты. Момент замыкания контактов называется моментом срабатывания реле. Наименьший ток, при котором реле срабатывает называется током срабатывания $I_{с.р}$, а наибольший ток, при котором реле возвращается в исходное положение - током возврата $I_{в.р}$.

Отношение:

$$R = I_{в.р} / I_{с.р} \quad (37)$$

Так же как и у реле прямого действия, называется коэффициентом возврата.

Уставки срабатывания токовых реле РТ-40 регулируются изменением натяжения пружины с помощью проводка 14 (рисунок 26) и изменением соединения катушек обмотки реле (последовательного или параллельного), что изменяет пределы шкалы в 2 раза. Нанесенные на шкале уставки соответствуют последовательному соединению катушек. При параллельном соединении уставки шкалы удваиваются. Коэффициент возврата у максимальных реле не менее 0,8 у минимальных – не более 1,2.

Для гашения вибрации контактов при ударах якоря об упоры у токовых реле РТ-40 имеется специальное механическое устройство - гаситель вибрации 18 (рисунок 26). Гаситель вибрации представляет собой небольшой полый цилиндр, укрепленный на одной оси с якорем и наполненный песком. При срабатывании реле песок поглощает энергию удара якоря об упор, чем предотвращается его отскакивание и вибрация контактов.

Высокочувствительное реле тока типа РТЗ-51 [33] предназначено для использования совместно с ТТНП в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защит ЭД от замыканий на землю.

Питание реле осуществляется от источника постоянного или выпрямленного тока напряжением 110 или 220В. При необходимости вместо постоянного оперативного тока к реле может быть подключен источник переменного тока напряжением 100В. Пределы регулирования тока срабатывания 0,02—0,12А. Средняя основная погрешность не более 10%. Коэффициент возврата реле составляет не менее 0,93, а время срабатывания при двукратном токе уставки не превышает 0,06с. В течение 1с реле выдерживает протекание тока, равного 60А. Контакт реле способен коммутировать в цепи постоянного тока с постоянной времени до 0,02с нагрузку мощностью не более 30Вт. Реле потребляет очень незначительную мощность от ТТНП: на минимальной уставке она не превышает 0,01В·А. Так как реле выполнено с использованием элементов полупроводниковой техники, в частности операционных усилителей, мощность от источника оперативного тока поступает постоянно и при срабатывании реле меняется незначительно. На постоянном оперативном токе реле потребляет около 10Вт, а на переменном 5—5,5В·А.

Принципиальная схема реле приведена на рисунке 27. Воспринимающая часть реле состоит из промежуточного трансформатора тока ТА, резисторов R2—R7, которые в сочетании с переключателями SB1—SB6 служат для дискретного регулирования уставок по току срабатывания.

Последовательно с первичной обмоткой трансформатора ТА включено сопротивление R1, ограничивающее ток во вторичной обмотке ТТНП при больших токах замыкания на землю, когда насыщение трансформатора ТА приводит к уменьшению сопротивления его первичной обмотки. Диоды VD1—VD4 предназначены для ограничения амплитуды входного сигнала.

Преобразующая часть реле представляет собой активный фильтр на операционном усилителе А1 с многоконтурной обратной связью, включающей резисторы R8, R9 и R10 и конденсаторы C1 и C2. Активным фильтром, настроенным на частоту 50 Гц, осуществляется отстройка реле от высших гармонических составляющих во входном токе. Кратность увеличения тока срабатывания реле на частоте 150Гц не менее 4, а на частоте 400Гц — не менее 15.

Сравнивающая часть реле состоит из порогового элемента, выполненного на операционном усилителе А2, времяизмерительной цепи VD5, R15, R16 и C7 и триггера Шмитта, построенного на оперативном усилителе А3. Конденсаторы C3—C10 являются корректирующими элементами операционных усилителей, исключающими их возбуждение. Резистор R17 является элементом обратной связи.

Для питания операционных усилителей в схеме реле применен параметрический стабилизатор, состоящий из резисторов R26 и R27, стабилитронов VD11 и VD12, конденсаторов СП и C12, обеспечивающих напряжение $\pm 1В$.

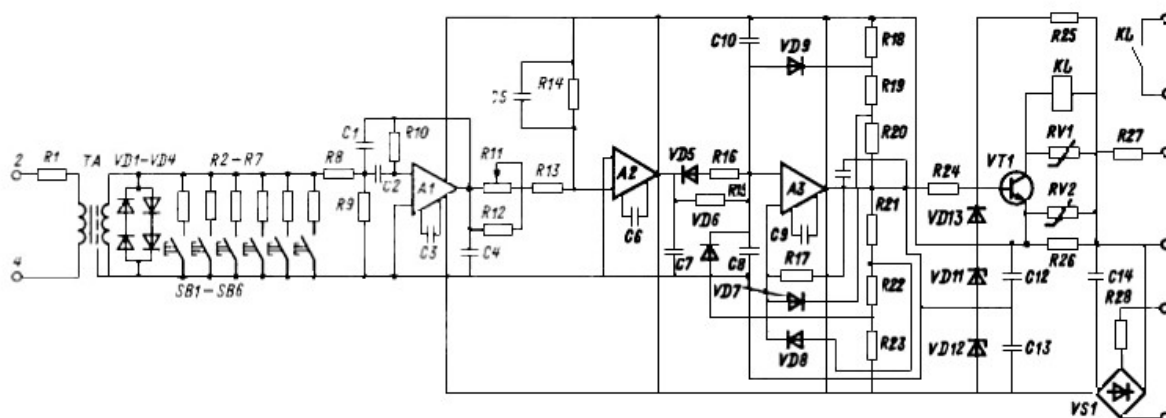


Рисунок 27 – Схема реле типа РТЗ-51

Схема питания реле от оперативного переменного тока включает в себя выпрямительный мост VS1, резистор R28 и конденсатор C14.

Исполнительный орган реле представляет собой усилительный каскад на транзисторе VT1, в цепь коллектора которого включено выходное быстродействующее реле KL.

Резисторами R24, R25 задается ток, открывающий транзистор VT1 в режиме срабатывания. Для защиты транзистора VT1 и диодов моста VS1 от перенапряжения в схеме используются варисторы RV1 и RV2.

Порог срабатывания порогового элемента задается резисторами R11—R14. Изменением сопротивления R11 обеспечивается настройка реле на минимальной уставки. Сигнал с выхода порогового элемента в зависимости от его полярности заряжает или разряжает конденсатор C8.

Для ускорения срабатывания и возврата реле предусмотрено ограничение уровня заряда и разряда конденсатора C8, которое выполнено на резисторах R18—R23 и диодах VD6—VD9.

При отсутствии входной воздействующей величины и в режиме, когда эта величина меньше установившегося порога срабатывания порогового элемента A2, конденсатор C8 времяизмерительной цепи заряжен до положительного потенциала, триггер Шмитта находится в несработавшем состоянии, транзистор VT1 закрыт и выходное реле не срабатывает.

При появлении входной воздействующей величины, превышающей порог срабатывания элемента A2, конденсатор C8 перезаряжается до напряжения, достаточного для срабатывания триггера. Транзистор VT1 открывается и выходное реле KL срабатывает.

Поляризованные реле являются разновидностью электромагнитных конструкций. В отличие от электромагнитных реле якорь поляризованного реле находится под воздействием двух магнитных потоков, на которых одни создается ток, а второй – постоянным магнитом. Магнитный поток обмотки называется рабочим, а постоянного магнита – поляризующим. Поляризованные реле выполняются в двух вариантах: с дифференциальной магнитной системой и мостовой.

Обе конструкции состоят из сердечника 1, обмотки 2, постоянного магнита 3, якоря 4 и контактной системы 5 (рисунок 28)

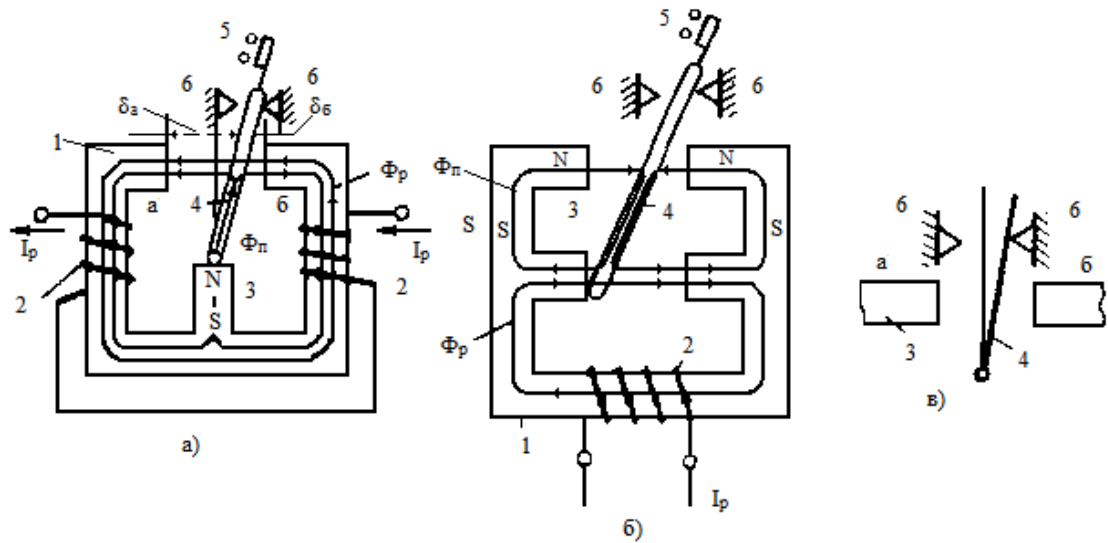


Рисунок 28 – Принцип устройства поляризованных реле

Рассмотрим принцип действия реле на примере более простой дифференциальной системы (рисунок 28). полярирующий магнитный поток $\Phi_{п}$ постоянного магнита выходит из северного полюса N и разветвляется на две части $\Phi_{па}$ и $\Phi_{пб}$, замыкающиеся через воздушные зазоры δ_a и δ_b и соответствующие половины сердечника 1. Обмотка 2, обтекаемая токами I_p , создает рабочий магнитный поток Φ_r , который замыкается по сердечнику 1 и по воздушным зазорам δ_a и δ_b .

Для простоты рассмотрения часть магнитного потока, ответвляющиеся через якорь, не учитывается. В воздушном зазоре δ_a магнитные потоки $\Phi_{п}$ и Φ_r , суммируются, а δ_b вычитаются, образуя результирующие магнитные потоки:

$$\Phi_a = \Phi_{па} + \Phi_r \text{ и } \Phi_b = \Phi_{пб} - \Phi_r$$

Под воздействием магнитного потока Φ_a якорь притягивается к левому полюсу а с силой $F_a = k\Phi_a^2$. Силе F_a противодействует сила $F_b = k\Phi_b^2$, стремящаяся притянуть якорь к правому полюсу б.

При определенном токе $I_p \geq I_{с.р}$ магнитный поток Φ_a становится больше магнитного потока Φ_b , сила $F_a > F_b$ и якорь отклоняется в лево, к полюсу а, замыкая контакты 5.

При изменении направления тока I_p поток Φ_r так же меняет свое направление, вследствие чего в зазоре δ_a возникает разность магнитных потоков, а в зазоре δ_b их сумма. Тогда при $I_p \geq I_{с.р}$ поток $\Phi_b > \Phi_a$, сила $F_b > F_a$ и якорь отклоняется вправо. Таким образом, благодаря наличию поляризирующего потока реле становится направленным и реагирует не только на значение тока, но и на его направление (полярность).

Аналогичным образом работает реле и с мостовой магнитной системой, приведенное на рисунке 28,б.

При питании реле переменным током якорь реле вибрирует, следуя за изменением направления тока. По этой причине поляризованные реле не пригодны для работы на переменном токе.

Поляризованные реле могут выполняться с односторонним и двухсторонним действием, с фиксацией и без фиксации начального положения якоря. Реле одностороннего действия с фиксацией начального положения якоря показано на рисунке 28,а,б. У этого реле упоры б, ограничивают ход якоря, устанавливаются так, что бы при любом положении якоря преобладало влияние одного из полюсов, например правого б. Для этой цепи зазор δ_a взят больше δ_b . Тогда при отсутствии тока I_p поляризующий магнитный поток $\Phi_{пб} > \Phi_{па}$, соответственно сила $F_b > F_a$ и якорь реле прижимается к правому упору под действием преобладающей силы F_b . При появлении $I_p > I_{с.р.}$ якорь отклоняется влево, замыкая контакты реле. После исчезновения тока I_p якорь возвращается под действием поляризующего поля в начальное положение.

Такая регулировка называется настройкой с преобладанием. Реле подобного типа наиболее часто применяется в схемах защиты.

Если упоры б расположить симметрично по отношению к среднему положению якоря в зазоре (рисунок 28,в), то такая регулировка называется нейтральной. В зависимости от направления I_p якорь отклоняется вправо или влево, замыкая соответствующие контакты реле. При исчезновении I_p якорь остается в том положении, в каком он находился при действии I_p . Следовательно такое реле работает как реле двухстороннего действия, но не имеет фиксированного начального положения якоря.

Поляризованные реле обладают важными преимуществами, к которым следует отнести: высокую чувствительность и малое потребление, достигающее при минимальном токе срабатывания и зазоре между контактами около 0,5мм, примерно 0,005Вт; высокую кратность тока термической стойкости, равную $(20 \div 50) I_{с.р.мин}$, у обычных электромагнитных реле термическая кратность не превышает $1,5 I_{с.р.мин}$; быстроту действия, которая достигает 0,005с.

Недостатками поляризующих реле являются: малая мощность контактов; небольшой зазор между ними, от 0,1 до 0,5мм, и относительно не высокий коэффициент возврата.

Поляризованные реле применяются в схемах релейной защиты как вспомогательные реле постоянного тока при необходимости быстрого действия и высокой чувствительности, а так же в качестве реагирующих (исполнительных) органов в схемах реле на выпрямленном токе.

1.6 Выводы

1. По результатам моделирования перенапряжения в сети с изолированной нейтралью в программах Electronics Workbench и Micro-Cap и сравнения их с

классическим методом ТОЭ, показали что Micro-Cap позволяет решать задачи этого класса в электроэнергетике с достаточно высокой точностью;

2. Анализ известных технических решений защит от однофазных замыканий на землю, показал что все они имеют ряд недостатков и не одна из них не обладает удовлетворяющей селективностью и чувствительностью, а следовательно разработка новых защит в этой области остается актуальной;

3. Проведена оценка известных защит и были предложены пути их совершенствования.

2 Преобразователи тока на герконах и катушках индуктивности

2.1 Герконы их свойства и возможность использование в релейной защите

Магнитоуправляемым контактом (МК) называется контакт электрической цепи, изменяющий состояние последней посредством механического замыкания или размыкания ее при воздействии управляющего магнитного поля на его элементы, совмещающие функции контактов и участков электрических и магнитных цепей.

Магнитоуправляемый контакт, помещенный в герметизированный баллон, называется герметизированным магнитоуправляемым контактом или герконом. Применяют их в качестве элементной базы в реле, переключателях, кнопках, распределителях, сигнализаторах и других электротехнических устройствах. Появление МК в технике позволило решить несколько задач;

Устранить воздействие на область контактирования как окружающей среды, так и продуктов, образующихся в процессе работы коммутационных аппаратов (кроме продуктов износа контактов);

Повысить механическую износостойкость и, в совокупности, увеличить ресурс и срок службы коммутационных аппаратов;

Максимально унифицировать элементную базу и упростить коммутационные аппараты, повысить их быстродействие.

Существенными достоинствами МК являются:

их металлический контакт полностью герметизирован;

они могут работать в условиях повышенной влажности и запыленности, в среде активных жидкостей и газов, при изменении температур от -60 до $+150$ С; практически не восприимчивы к воздействию радиации;

обеспечивают полную гальваническую развязку цепей нагрузки и управления;

имеют низкое контактное электрическое сопротивление ($0,05 - 0,25 \text{ Ом}$), высокое электрическое сопротивление изоляции $10^9 - 10^{12} \text{ Ом}$) и быстродействие ($0,3 - 3 \text{ мс}$);

обеспечивают большое количество срабатываний при высокой надежности (до $10^6 - 10^9$ циклов переключения)

обладают высокой устойчивостью к внешним механическим воздействиям (одиночные удары до 150 g , вибрации в диапазоне частот до 3000 Гц при ускорении $15 - 30 \text{ g}$);

имеют простую конструкцию и могут управляться внешним магнитным полем, создаваемым как катушкой или шиной в токе, так и постоянным магнитом; возможна их внешняя поляризация [41].

Эти достоинства МК позволяют применять их в качестве коммутационных элементов в различных реле, концевых выключателях, датчиков положения, скорости и ускорения, кнопках, клавиатурах, тумблерах, индикаторов перемещения и распределение сигналов, в высокочастотных и измерительных системах спецтехники и т.д.

Существуют сухие МК (с твердыми контактами) и смоченные жидким металлом – смоченные или жидкометаллические МК (ЖМК).

Так как детали МК реализуют функции контактов и участков электрических и магнитных цепей, авторы называли их контактными сердечниками (КС). Используется так же термин “контакт-детали” (КД). Они

могут быть подвижными и не подвижными. Часто подвижные КС выполняются гибкими и играют роль возвратной пружины. Если КС гибкие и подвижные, то МК называют безъякорными, так как нет жесткого подвижного элемента магнитной системы – якоря, характерного, для негерконовых электромагнитных реле. К безъякорным относятся язычковые и мембранные МК. Первые получили наибольшее распространение. Якорные МК бывают как с возвратной пружиной, так и без нее. Возврат якоря в исходное положение при отсутствии пружины осуществляется магнитным полем. Наибольшее распространение в мире имеют язычковые МК и якорные МК с возвратной пружиной.

Язычковыми называются МК, содержащие КС в виде консольно закрепленных пластин или стержней, изгибающихся под действием магнитного поля.

Наиболее распространенные виды язычковых МК:

Симметричные и асимметричные замыкающие МК;

Переключающий МК вида РП-З (размыкаемый (Р) и переключающий (П) контактные сердечники закреплены с одной стороны герметизированного баллона, а замыкаемый (З) – с другой);

Переключающий МК вида РЗ-П (размыкаемый и замыкаемый КС расположены с одной стороны баллона, а переключающий – с противоположенной) [41].

В настоящее время наиболее распространенные и универсальные материалы для контактного покрытия в МК – родий и рутений. С целью создания низкого сопротивления при коммутации малых токов и напряжений для контактного покрытия так же сплавы на основе золота. В высоковольтных МК и в МК, коммутирующих повышенные токи, применяются тугоплавкие материалы (например, вольфрам, молибден) и их сплавы с другими металлами. Защитная среда в баллоне предохраняется покрытием МК от обычного для них окисления на воздухе. Существуют так же более сложные многослойные и многоструктурные покрытия.

При отсутствии управляющего магнитного поля перекрывающиеся поверхности внутренних концов КС удалены друг от друга на размер начального немагнитного рабочего зазора. При этом между поверхностями контактных покрытий имеется раствор который и у сухих язычковых МК составляет обычно от 10 до 300мкм. Внешние концы КС служат для присоединения МК к коммутируемой электрической цепи.

При воздействии управляющего магнитного поля от шины с током, обмотки с током или постоянного магнита (ПМ) между КС возникает электромагнитная сила. Эта сила, преодолевая механическую силу упругости КС, приближает их внутренние концы друг к другу. При определенной напряженности поля (значения срабатывания) КС переходят в замкнутое состояние, которому соответствует конечный рабочий зазор.

Уменьшение напряженности поля значения отпуская вызывает размыкание КС под действием сил их упругости.

Ассиметричный язычковый замыкающий МК имеет разные КС, один из которых более гибкий. Такой МК сложнее в изготовлении:

Различные КС;

Необходимо при заварке установки одного КС под углом к продольной оси баллона, если желательна параллельность контактирующих поверхностей при их соприкосновении;

Труднее предотвратить разрушение контактирующих поверхностей под действием тепла, выделяющегося при заварке более короткого КС, так как контактирующие поверхности располагаются ближе к месту заварки;

Однако асимметрия помогает решить проблему миниатюризации, так как для одного и того же раствора с возрастающей механической силы КС длину баллона удастся получить меньше, чем при симметричном исполнении.

Применение асимметричных язычковых МК дает так же возможность в ряде случаев получить более компактные переключатели, управляющие магнитное поле в которых создается подвижными ПМ. Принцип действия асимметричных язычковых замыкающих МК такой же как и у симметричных конструкций[41].

Применение раздвоенных КС позволяет снизить дребезг при коммутации, что повышает ресурс МК. Соприкосновение КС с баллоном ограничивает их свободные колебания после размыкания и способствует таким образом повышению допустимой частоты коммутации – до 500Гц. Число коммутаций слаботочной цепи такими МК – до 250млн.

Использование МК с плоскими баллонами позволяет решить несколько задач: во-первых, уменьшит высоту герконовых реле, что дает возможность размещать их в корпусах стандартных микросхем; во-вторых, уменьшить длину среднего витка обмоточного провода в реле, что приводит к экономии провода и снижению мощности управления; в-третьих, сократить время ресурсных испытаний [34, 35].

Жидкометаллические МК (ЖМК), называемые так же смоченными МК, - это МК, внутри герметизированного баллона, которых токопроводящие детали частично или полностью смочены жидким металлом. Наиболее распространенный смачивающий материал – ртуть. Это единственный чистый металл, который при нормальной температуре находится в жидком состоянии.

Благодаря смоченности контактирующих поверхностей в ЖМК можно устранить разрывы электрической цепи при вибрации КС после их первого соударения, снизить сопротивление МК в замкнутом состоянии и повысить его стабильность до 1-2мОм в течении срока службы, увеличить ресурс. Быстрое установление контакта позволяет с помощью ЖМК формировать сигналы с наносекундным фронтом.

Для каждого МК установлена своя стандартная обмотка управления. Все параметры МК, указанные в научно-технической документации (НТД), определяются по результатам испытаний в этой обмотке, обычно шунтируемой диодом. Напряжение приложенное к разомкнутому КС, ток, пропускаемый через МК, характер нагрузки и режим управления при определении функциональных и временных параметров МК в стандартных обмотках принимаются, такими, что бы не оказывать практического влияния на эти параметры.

При эксплуатации МК в конкретных изделиях возможно несоответствие их параметрам, указанным в НТД на МК. Это несоответствие определяется отличием работы МК в этих изделиях и в стандартных обмотках. Например, число срабатываний МК в различных переключателях (управляющий орган ПМ) или реле (имеются дополнительные магнитопроводы и параметры обмотки управления отличаются от параметров стандартной обмотки) может не соответствовать числу срабатываний, указанному в НДТ по результатам испытаний этих МК в стандартных обмотках.

В условиях воздействия магнитного поля обмотки между КС возникает электромагнитная сила $P_{эм}$, которая, преодолевая механическую силу упругости КС $P_{мх}$, приближает их друг другу.

При медленном увеличении магнитодвижущей силы (МДС) обмотки рабочий немагнитный зазор между КС уменьшается от начального значения – КС находится в устойчивом состоянии. Дальнейшее медленное увеличение МДС сближает их до зазора срабатывания.

С уменьшением МДС до значения отпускания, КС разомкнутся и после цикла затухания колебаний останутся на расстоянии. Снижение МДС до нуля при отсутствии магнитного и механического гистерезиса возвращают КС в первоначальное положение[41].

2.2 Максимальная токовая защита на герконах для сетей с изолированной нейтралью

Вследствие недостаточной чувствительности релейных защит ВЛ сверхвысокого напряжения, реагирующих на токи промышленной частоты, в нашей стране и за рубежом разрабатываются релейные защиты, реагирующие на волновые переходные процессы. Эти защиты обладают высокой чувствительностью и быстродействием, практически не зависящими от предшествующих режимов (токов нагрузки). Для работы этих защит необходимо, чтобы токоизмерительные устройства точно воспроизводили форму измеряемого тока при волновых процессах. В частности, частотная полоса пропускания токоизмерительного устройства для запуска указанных защит должна быть в пределах от 20Гц до 20кГц. Современные измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения не удовлетворяют этим требованиям, так как конструктивно выполняются многокаскадными, что приводит к повышению погрешности.

В связи с вышеуказанным целесообразна разработка токоизмерительных устройств, работа которых основана на иных, нежели у трансформаторов тока, физических законах и обладающих по сравнению, с последними более высокими технико-экономическими показателями. Новые токоизмерительные устройства различаются по принципу передачи информации с высоковольтного провода на землю. Наиболее просто токи ВЛ СВН могут быть измерены по их магнитным полям.

В секторе сильных электромагнитных полей Энергетического института им. Г.М. Кржижановского предложен безынерционный дистанционный измеритель токов ВЛ. В качестве магниточувствительного элемента (МЭ) в этих устройствах используются гальвано-магнитные полупроводниковые преобразователи Холла с концентраторами магнитного поля. Они обладают следующими достоинствами: точно воспроизводят форму тока в широком частотном диапазоне; практически безынерционны; допускают повышение помехоустойчивости, в частности, путем модулирования выходного сигнала током питания преобразователей Холла заданной частоты; позволяют проводить исследования с потенциала земли волновых процессов в ВЛ и таким образом исследовать волновые характеристики последних.

В течение ряда лет подобные устройства испытывались на ВЛ 500 и 750кВ. Испытания показали их работоспособность, помехоустойчивость, возможность практического применения для релейной защиты и автоматики энергосистем и других задач электроэнергетики.

Измерение токов ВЛ СВН наименьшим количеством МЭ. Основная трудность, возникающая при измерении токов ВЛ по их магнитному полю, заключается в том, что МЭ, произвольно размещенный под проводами ВЛ, реагирует на магнитное поле токов всех проводов линии. При измерении тока в одном из проводов необходимо исключить влияние токов в других проводах, что приводит к увеличению числа МЭ. Так приведен способ дистанционного измерения токов трехпроводной линии с помощью девяти МЭ (индукционных катушек). Авторами настоящей статьи ранее была испытана схема измерения каждого из фазных токов трехпроводной линии с помощью двух МЭ. Идея предложения заключается в том, что МЭ образуют решающую схему, напряжение на выходе которой пропорционально измеряемому току.

Ниже показан принцип образования таких схем с использованием МЭ на основе гальвано-магнитных преобразователей Холла при следующих допущениях: принимается, что провода расположены в плоскости, параллельной поверхности земли, а магнитное поле ВЛ считается плоскопараллельным; не учитывается искажение топологии магнитного поля от ферромагнитных сред (например, порталов); магниточувствительные элементы считаются точечными, реагирующими на нормальную к пластинам преобразователей Холла составляющую индукции магнитного поля; расщепленные фазы заменяются одним проводом, размещенным в геометрическом центре многоугольников, образованных проводами данной фазы.

В дальнейшем будем линии считать трехпроводными. Однако предлагаемый подход к решению поставленной задачи остается верным и для многопроводной линии с проводами, не лежащими в одной плоскости.

Мгновенное значение выходного сигнала МЭ e_x , размещенного под проводами ВЛ, пропорционально току питания преобразователей Холла и нормальной к пластинам преобразователей Холла составляющей индукции магнитного поля. Оно характеризуется коэффициентом чувствительности магниточувствительного элемента u . Для линейной среды справедливо:

$$\vec{H} = \sum_1^3 \vec{H}_s, \quad (38)$$

где $\vec{H}$ - вектор напряженности магнитного поля в некоторой точке пространства;

$\vec{H}_s$ - вектор напряженности магнитного поля, возбуждаемый током в s-м проводе, или:

$$\vec{H}_n = \sum_1^3 \vec{H}_{sn};$$

$$H_{sn} = \frac{i_s}{2\pi r_s} \sin(\vec{r}_s \vec{n}),$$

где H_{sn} - нормальная составляющая вектора напряженности магнитного поля к поверхности преобразователя Холла, возбуждаемая током i_s в точке наблюдения;

$\vec{r}_s$ - радиус-вектор, проведенный из точки размещения МЭ к s-му проводу;

$\vec{n}$ - единичный вектор положительной нормали к поверхности преобразователя Холла.

Тогда:

$$e_x = \gamma H_n = \frac{\gamma}{2\pi} \sum_1^3 \frac{i_s}{r_s} \sin(r_s n) \quad (39)$$

Выражение (39) имеет три неизвестных, поскольку размещение МЭ и их ориентация известны, а ЭДС Холла поддается измерению. Размещая три МЭ соответствующим образом относительно проводов трехпроводной ВЛ, всегда можно добиться, чтобы система из трех выражений, аналогичных (39), рассматриваемая как система трех уравнений относительно токов i_s , имела решение, т. е. получить систему независимых друг от друга уравнений. Таким образом, с помощью вычислительного устройства можно выделить сигналы, пропорциональные мгновенным значениям токов и их любых линейных комбинаций. Однако этого можно добиться и схемным способом, образуя решающую схему путем соответствующего соединения между собой выходных зажимов преобразователей Холла и подходящего выбора их чувствительности.

Рассмотрим два МЭ, для которых справедливо следующее:

$$e_{xm} = \gamma_m (\beta_{1m} i_1 + \beta_{2m} i_2 + \beta_{3m} i_3) = \gamma_m \sum_1^3 i_s \beta_{sm}; \quad (40)$$

$$e_{xn} = \gamma_n (\beta_{1n} i_1 + \beta_{2n} i_2 + \beta_{3n} i_3) = \gamma_n \sum_1^3 i_s \beta_{sn},$$

где β_{sm} и β_{sn} - коэффициенты, определяемые размещением и ориентацией m -го и n -го МЭ относительно s -го провода. Пусть $\gamma_m/\gamma_n = \varepsilon$. Тогда, включая выходы обоих МЭ по схеме суммирования, получим выходной сигнал:

$$e_{xm} + e_{xn} = \gamma_n [(\beta_{1n} + \varepsilon\beta_{1m})i_1 + (\beta_{2n} + \varepsilon\beta_{2m})i_2 + (\beta_{3n} + \varepsilon\beta_{3m})i_3]. \quad (41)$$

Если МЭ расположить в пространстве так, чтобы коэффициенты при токах в выражении (41) принимали нужные значения, то можно получить на выходе, схемы сигналы, пропорциональные мгновенному значению какого-либо из токов, либо их линейным комбинациям. Так, для выделения сигнала, пропорционального i_1 необходимо, чтобы $\beta_{2n} + \varepsilon\beta_{2m} = \beta_{3n} + \varepsilon\beta_{3m} = 0$, а для получения на выходе сигнала, пропорционального алгебраической сумме фазных токов:

$$\beta_{1n} + \varepsilon\beta_{1m} = \beta_{2n} + \varepsilon\beta_{2m} = \beta_{3n} + \varepsilon\beta_{3m} = 0.$$

При этом получаются системы уравнений с семью (координаты МЭ, их ориентация, соотношение чувствительностей) неизвестными и, следовательно, такие системы обладают бесконечно большим количеством решений. Чтобы получить требуемые решения, примем дополнительные условия: необходимость размещения МЭ на безопасном расстоянии от высоковольтных проводов, получение на выходе достаточного сигнала, сведение к минимуму влияния тока других фаз, наложенные связи между токами, а также требование уменьшения влияния факторов, обуславливающих погрешность измерения. Ниже рассматриваются конкретные примеры пространственного расположения преобразователей Холла при измерении токов и их линейных комбинаций и показаны способы уменьшения необходимого для этих целей количества МЭ.

Для измерения алгебраической суммы токов (токов нулевой последовательности) достаточно двух МЭ, размещенных под проводами таким образом, чтобы коэффициент передачи тока устройства по отношению к токам двух фаз был одинаков.

На рисунке 29 показаны два МЭ (m и n), произвольно размещенные под проводами ВЛ (H_n и H_m — единичные векторы положительных нормалей к пластинам преобразователей Холла соответствующих МЭ). Здесь и далее для удобства будем за единицу линейного размера считать D — междуфазное расстояние. Пусть МЭ обладают одинаковой чувствительностью ($\varepsilon = 1$). Если их выходы включить согласно, то, как следует из (41), для измерения токов нулевой последовательности необходимо принять:

$$\beta_{1n} + \beta_{1m} = \beta_{2n} + \beta_{2m} = \beta_{3n} + \beta_{3m}. \quad (42)$$

При произвольном размещении МЭ коэффициенты β_{sj} ($s = 1, 2, 3; j = m, n$) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{1j} &= -\frac{1}{2\pi D} \frac{(x_j + 1) \sin a_j - y_j \cos a_j}{y_j^2 + (x_j + 1)^2}; \\ \beta_{2j} &= -\frac{1}{2\pi D} \frac{x_j \sin a_j - y_j \cos a_j}{x_j^2 + y_j^2}; \\ \beta_{3j} &= -\frac{1}{2\pi D} \frac{(x_j - 1) \sin a_j - y_j \cos a_j}{y_j^2 + (x_j - 1)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

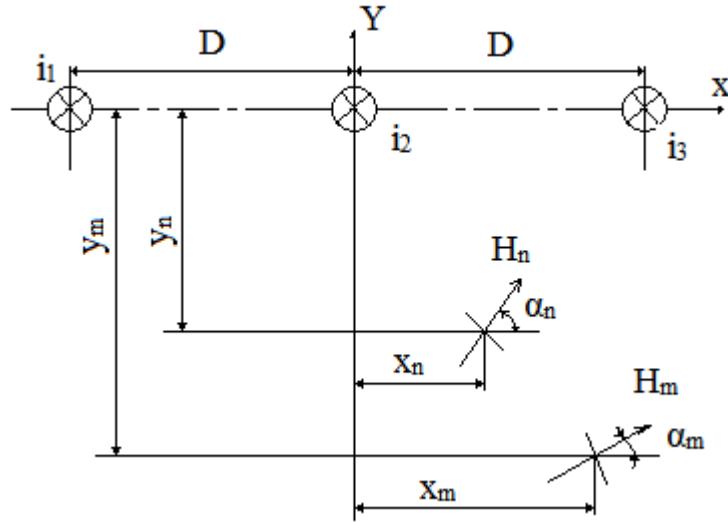


Рисунок 29 – Размещение магниточувствительного элемента

$$\left. \begin{aligned} y_n &= y_m = -y \\ -X_n &= X_m = X \\ -a_m &= a_n = a \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

$$3yx^2 - y^3 - \operatorname{tga}(x^3 - 3xy^2 - x) = 0 \quad (45)$$

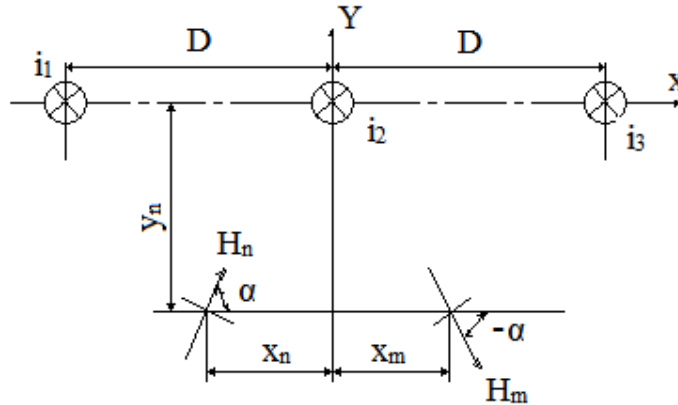


Рисунок 30 – Схема расположение магниточувствительного элемента

Полученное решение соответствует расположению МЭ, изображенному на рисунке 30. При расположении МЭ в соответствии с (44) и (45) их суммарный сигнал:

$$e_{0\Sigma} = \frac{\gamma}{2\pi D} \frac{x \operatorname{tg} a - y}{x^2 + y^2} \frac{2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a}} (i_1 + i_2 + i_3) + \gamma \beta_{0\Sigma} (i_1 + i_2 + i_3) \quad (46)$$

Где $\beta_{0\Sigma}$ – коэффициент передачи устройства по отношению к суммарному току. Уравнения (44) и (45) имеют бесчисленное множество решений. При $a = 0$ получаем:

$$y = \sqrt{3x^2 - 1}$$

$$e_{0\Sigma} = -\frac{\gamma}{2\pi D} \frac{\sqrt{3x^2 - 1}}{4x^2 - 1} (i_1 + i_2 + i_3).$$

Условие получение максимального входного сигнала дает:

$$\frac{de_{0\Sigma}}{dx} = \frac{d\beta_{0\Sigma}}{dx} \quad (47)$$

Решая (47), находим:

$$x = \sqrt{\frac{5}{12}}; \quad y = 0,5.$$

Внедрение защит без трансформаторов тока (ТТ) на вновь вводимых подстанциях 3—35кВ промышленных предприятий (ежегодно до 2000) по приблизительным подсчетам позволило бы сэкономить за пятилетку около

0,6 тыс. т. меди и 3 тыс. т. проката черных металлов. Вместе с тем во многих случаях нельзя обойтись без ТТ, выполняющих функции источников оперативного тока (примерно 40—50 % всех ТТ) .

Работы в направлении создания защит без ТТ ведутся давно как в нашей стране, так и за рубежом. Особый интерес представляют разработки защит на магнитоуправляемых контактах (МК) — герконах, устанавливаемых на безопасном расстоянии h от токоведущих шин (рисунок 31). Эти герконы дешевле и чувствительнее, чем другие магнитоуправляемые элементы (магнитодиод, магнитотранзистор, магниторезистор), не требуют специальных источников питания, не критичны к окружающей температуре, совмещают в себе функции измерительного и аналого-дискретного преобразователей, измерительного преобразователя и токового реле и при этом не нуждаются в трансреакторах и выпрямителях в отличие от аналогичных реле тока на интегральных элементах.

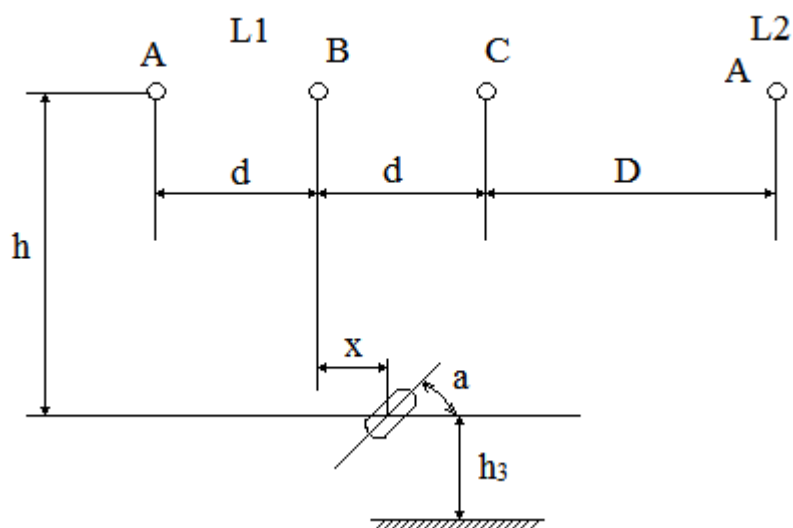


Рисунок 31 – Расположение геркона при горизонтальном расположении фаз

Внедрение такого рода разработок сдерживается, однако, рядом субъективных и объективных причин. Так, существует мнение, что защиты на МК не следует внедрять из-за значительного внутритипового разброса МДС срабатывания ($F_{ср}$), коммутации управляемой цепи с частотой 100Гц при срабатывании МК и сложной настройки. К объективным причинам можно отнести отсутствие метода расчета уставок подобных защит. Действительно, при определении тока срабатывания МК $I_{с.р}$ пользоваться диапазоном $F_{ср}$, приведенным в паспортных данных, нельзя, так как погрешности расчета $I_{с.р}$ будут слишком велики (к тому же $F_{ср}$ зависит от длины l_k катушки). При расчете $I_{с.р}$ следует пользоваться напряженностью срабатывания $H_{ср} = F_{ср} / l_k$, которая является неизменной величиной для данного геркона. Тогда перед установкой МК предварительно надо поместить в катушку с переменным током и определить $H_{ср}$.

Что касается коммутации управляемой цепи с частотой 100Гц при срабатывании МК (а также его несрабатывания в один из полупериодов при наличии значительной апериодической составляющей), то для получения на выходе реле непрерывного сигнала можно применять типовые схемы расширителей импульсов. Рассматривая вопрос настройки защиты на МК, следует отметить, что она не сложнее настройки любого токового реле традиционных защит, только осуществляется по-другому: определяется $I_{ср}$ и в расчетной точке устанавливается МК.

Далее рассматривается выбор тока срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ) на МК.

Магнитоуправляемый контакт срабатывает под действием магнитного поля (МП), созданного токами в шинах, и в результате МТЗ на МК реагирует на увеличение тока, протекающего по защищаемому элементу.

Функциональная схема защиты показана на рисунке 32, где приняты следующие обозначения: 1-МК, 2- расширитель импульсов, 3 - реле времени, 4 — исполнительный орган. Реализация схемы принципиальных трудностей не представляет. Она может быть выполнена так же, как в защитах на МК с ТТ или, например, с помощью выпускаемых промышленностью счетчиков импульсов (тогда МК подключается непосредственно к счетчику).



Рисунок 32 – Функциональная схема защиты

Понятия токов срабатывания $I_{с.з}$ и возврата $I_{в.з}$ защиты, временные характеристики $t = f(I)$ и критерий оценки чувствительности по коэффициенту чувствительности $\gamma_{и}$ остаются теми же, что и для МТЗ с ТТ. Не применяются понятия коэффициента трансформации и коэффициента схемы. В установках постоянного тока $I_{в.р} = I_{в.з}$, а коэффициент $\gamma_B = I_{в.р} / I_{с.р} = I_{в.з} / I_{с.з}$ и $\gamma_B = \gamma_{МК}$ (где $I_{в.р}$ и $\gamma_{МК}$ — ток возврата реле и коэффициент возврата МК). В установках переменного тока при наличии упомянутых расширителей или счетчиков импульсов:

$$I_{в.р} / I_{с.р} \neq I_{в.з} / I_{с.з} = 1. \quad (48)$$

При горизонтальном расположении фаз (рисунок 31)

$$I_{с.р} = H_{ср} \Delta g = 2\pi w I_{кат} / l_k \Delta g = 2\pi F_{ср} / l_k \Delta g, \quad (49)$$

где $I_{кат}$ — минимальный ток срабатывания МК в обмотке катушки соленоида (длиной l_k и с числом витков w), в которой измеряется $F_{ср}$;

Δg – величина, зависящая от того, в каких фазах протекают токи, действующие на МК.

Для исключения ложного срабатывания МК МТЗ линии L1 (рисунок 31) необходимо, чтобы:

$$B_{c.3} > B_{L1} + B_{L2} + B_3, \quad (50)$$

где $B_{c.3}, B_{L1}, B_{L2}, B_3$ – действующие вдоль оси МК составляющие индукции МП соответственно от токов L1 в режиме самозапуска, от соседней линии L2 при КЗ от токов в земле при КЗ и при которой срабатывает МК.

Допустимые значения g_c увеличиваются в сравнении со значениями g_c МТЗ, получающих информацию от ТТ, до 2 в конце защищаемого участка и на шинах противоположной подстанции и до 1,6 в конце смежного участка, так как значение $I_{c.p}$ МК может превысить расчетное в 1,3 раза из-за погрешностей установки. Значение 1,3 получено на ЭВМ путем расчета $I_{c.p}$ по выражению (49) при всех сочетаниях параметров и отклонений $\Delta h = \Delta x = \pm 5$ мм, $\Delta \gamma = \pm 5^\circ$. Кроме того, чувствительность и область применения защит ограничиваются чувствительностью МК. Максимальная чувствительность МК характеризуется минимальным током $I_{c.p.min}$ в шинах электроустановки, при котором МК еще срабатывает.

Расчеты показали, что для большинства электроустановок 6—35 кВ, а в ряде случаев и 110—220 кВ, токи КЗ превышают токи, определенные по этой формуле. Иногда требуемую чувствительность МТЗ можно обеспечить, выводя их из работы при срабатывании МК, дополнительно устанавливаемых для выявления значительных токов в земле, или замедляя (МТЗ электроприемников) на 0,06 с, чтобы не отстраиваться от апериодической составляющей [36].

2.3 Катушки индуктивности как преобразователи тока

Получили распространения магнитные трансформаторы тока типа ТВМ [37]. Магнитные ТТ представляют собой катушку, расположенную на определенном расстоянии от провода, по которому проходит контролируемый ток. При прохождении в проводе (например, фазы А) тока I_A в обмотке датчика этой фазы индуцируется ЭДС, являющаяся функцией тока.

Магнитные ТТ отличаются от обычных электромагнитных ТТ, широко применяемых в схемах релейной защиты: зависимостью коэффициента взаимоиндукции, а следовательно, и коэффициента трансформации от конструктивных особенностей датчика, а так же от того, как он располагается относительно провода с контролируемым током; необходимостью учета влияния “посторонних” токов, проходящих по соседним проводам и создающих в обмотке датчика помехи; малой мощностью на выходе, вследствие чего

магнитны ТТ могут применяться лишь с устройствами релейной защиты, имеющими малое потребление.

Для уменьшения влияния помех были разработаны магнитные ТТ с дифференциальными датчиками типа ТВМ [37]. Подобные ТТ представляют собой стальной сердечник П – образной формы с двумя одинаковыми, соединенными встречно – последовательно обмотками 1 и 2, надетыми на полюсы сердечника.

Проекция провода фазы А, для контроля за которым предназначен датчик, находится в центре сердечника. Магнитный поток Φ_A , пропорциональный току I_A , проходит по полюсам сердечника в противоположенных направлениях. При этом, поскольку обмотки ТВМ соединены встречно, ЭДС обеих обмоток суммируется арифметически: ЭДС E_A равно удвоенной ЭДС каждой обмотки.

Магнитные потоки, создаваемые токами других фаз (например, Φ'_B и Φ''_B , пропорциональны току I_B), проходят по полюсам ТВМ в одном направлении, и индуцируемые ими ЭДС в обмотках вычитаются. Благодаря этому уменьшаются помехи, создаваемые в ТВМ токами соседних фаз. Трансформаторы ТВМ устанавливаются на разъединителях или отделителях высокого напряжения и крепятся с помощью фиксаторов из немагнитного материала. Для повышения мощности, отдаваемой трансформаторами тока ТВМ, на его выходе обычно подключается конденсатор.

Основным элементом МТТ служит его обмотка, ферромагнитный магнитопровод отсутствует, либо имеется, но он разомкнут и не насыщается. Под воздействием первичного и мешающих токов в обмотке МТТ индуцируется ЭДС взаимной индукции и формируется сигнал измерительной информации, у которого в качестве информационного параметра, как правило, используется, напряжение.

Первичный провод вместе с МТТ образуют ИПТ подобный по принципу действия трансреактору. Функцию первичной обмотки выполняет первичный провод, а вторичной – обмотка МТТ. Основное его отличие от традиционного трансформатора ТР состоит в том что: нельзя пренебрегать влиянием мешающих токов, как это было при исследовании режимов работы традиционного ТР; коэффициент преобразования первичный ток – вторичное напряжение зависит не только от конструктивных данных МТТ, но и от того, как МТТ расположен относительно первичного провода, а так же от конструкции этого провода.

Взаимная индуктивность первичного провода и магнитного трансформатора тока:

$$M_{и} = M_e Y_{и}, \quad (51)$$

где M_e - конструктивный коэффициент, далее называемый единичным коэффициентом взаимной индукции, зависящий от конструктивных данных МТТ. и является параметром типо-размера МТТ, может нормироваться независимо от предстоящего места установки и проверяться экспериментально при выпуске МТТ на заводе;

$Y_{\text{и}}$ — установочный коэффициент МТТ относительно первичного провода. Зависит от расположения МТТ относительно первичного провода и от конструкции провода.

Так же определяются взаимные индуктивности обмотки МТТ и проводов с мешающими токами. Они различаются только значениями установочных коэффициентов.

Далее подразумевается, что МТТ используют для получения информации о фазных токах линий в схемах РЗ сетей напряжением 35— 220кВ и устанавливают на подстанциях вблизи фазных проводов линий. Наибольшие влияния на погрешности измерения тока фазы оказывают магнитные помехи, создаваемые токами соседних фаз и током в заземляющем устройстве подстанции (при однофазных КЗ в сети).

При исследовании режимов работы МТТ первичный и токи соседних фаз эквивалентированы единичными токами, которые при $Y = 1$ создают такие же ЭДС в обмотке МТТ, как реальные токи при реальных значениях установочных коэффициентов. Процесс такого эквивалентирования далее называется процессом приведения токов к единичным условиям. Он адекватен процессу приведения первичных токов к числу витков вторичной обмотки (или к одному витку) при исследовании режимов работы ИПТ на основе трансформатора.

В процессе приведения к единичным условиям реальные токи умножаются на реальные установочные коэффициенты.

Единичный первичный ток (мгновенный) равен:

$$i_{1e} = i_1 Y_{\text{и}}. \quad (52)$$

Единичный ток одной, мешающий фазы (ближней) равен:

$$i_{n1e} = i_{n1} Y_{n1}, \quad (53)$$

где i_{n1} и Y_{n1} — реальный мгновенный ток этой фазы и реальный установочный коэффициент МТТ относительно провода этой фазы.

Единичный мешающий ток другой фазы (дальней):

$$i_{n2e} = i_{n2} Y_{n2} \quad (54)$$

где i_{n2} и Y_{n2} — реальный мгновенный ток этой фазы и реальный установочный коэффициент МТТ относительно провода этой фазы.

При расчете магнитных помех, создаваемых током в заземляющем устройстве подстанции, принимается, что магнитную помеху создает не весь ток в заземляющем устройстве i_i , а только его часть $a_i i_i$, которая сосредоточена в воображаемом прямолинейном проводе. Этот провод расположен под поверхностью земли на уровне заземляющего устройства подстанции и

располагается вдоль одной из заземляющих полос. При этом единичный мешающий ток в земле:

$$i_{te} = a_t i_t Y_t \quad (55)$$

где Y_t – установочный коэффициент МТТ относительно воображаемого провода.

Мгновенная ЭДС в обмотки МТТ:

$$e_d = M_e (di_e / dt + di_{n1e} / dt + di_{n2e} / dt + di_{te} / dt) = M_e di_e / dt \quad (56)$$

У данного типоразмера МТТ ЭДС является однозначной функцией единичного тока независимо от того, как МТТ установлен на подстанции, а если задана и нагрузка, то напряжение сигнала тоже является однозначной функцией единичного тока МТТ.

Кроме основной обмотки МТТ должен иметь еще испытательную обмотку из небольшого числа витков, расположенную таким образом, чтобы при прохождении по ней испытательного тока в основной обмотке возбуждалось такое же потокосцепление, как под воздействием единичного тока $I_e = K_{э,е} I_{и}$ где $K_{э,е}$ - единичный коэффициент эквивалентности. Испытательная обмотка используется при испытаниях защиты с МТТ и при периодических проверках исправности МТТ в процессе эксплуатации. На принципиальных схемах МТТ как отдельных аппаратов эта обмотки обычно не показывается.

Расчетная схема замещения МТТ с нагрузкой приведена на рисунки 33,6. Она отличается от расчетной схемы замещения ТР тем, что питается от источника ЭДС, зависящей не только от первичного тока, но и от мешающих токов и равной:

$$e_d = M_e di_e / dt \quad (57)$$

У МТТ в отличие от ТТ или ТР следует различать характеристики холостого хода двух видов: реальную и единичную. Единичная характеристика ХХ изображает зависимость напряжения на зажимах разомкнутой обмотки МТТ от единичного тока МТТ. Она является характеристикой типоразмера МТТ и снимается экспериментально в условиях, когда магнитные помехи отсутствуют, а $Y_{и} = 1$.

Реальная характеристика ХХ изображает зависимость напряжения на разомкнутой обмотке МТТ от реального первичного тока в условиях отсутствия магнитных помех или от одного какого-нибудь мешающего тока.

Основными параметрами МТТ как отдельного аппарата наряду с M_e являются: R_d — активное сопротивление обмотки; x_d - индуктивное сопротивление обмотки при частоте 50Гц; $K_e = U_{02}/I_e$ - единичный коэффициент преобразования (В/кА); S_e — единичная мощность МТТ, равная мощности сигнала в условиях, когда $I_e = 1$ кА, а нагрузка имеет активное $R_{н} = R_d$ и

индуктивное $x_n = x_l$ сопротивления, единичный ток синусоидальный, частота 50Гц.

Все основные параметры МТТ определяются при нормальной температуре окружающей среды равной 20°C.

Если МТТ не имеет ферромагнитного магнитопровода, то, как и у линейного ТТ или ТР, все его характеристики ХХ строго прямолинейны, а значения всех основных параметров не зависят от единичного тока. У МТТ с ферромагнитным магнитопроводом, хотя и разомкнутым и не насыщающимся в расчетных режимах, такие параметры, как M_e , x_l , K_e , несколько зависят от тока. У таких МТТ указываются номинальные значения основных параметров.

Установочный коэффициент МТТ относительно заданного провода является функцией трех коэффициентов:

$$U = K_1 K_a K_{ф.п}, \quad (58)$$

где K_1 - коэффициент удаленности, зависящий от расстояния по прямой между центром МТТ и центром провода, $K_t = 1$ при $l = 1$ м;

K_a - коэффициент ориентации МТТ, зависящий от того, как МТТ ориентирован на данный провод; ориентация, при которой при данном расстоянии получается наибольшая взаимная индуктивность МТТ и данного провода, называется нормальной ориентацией;

$K_{ф.п}$ - коэффициент формы провода; он зависит от формы и длины провода и принимается равным 1, если провод прямой и настолько длинный, что дальнейшее увеличение длины практически не отражается на значении взаимной индуктивности МТТ и провода.

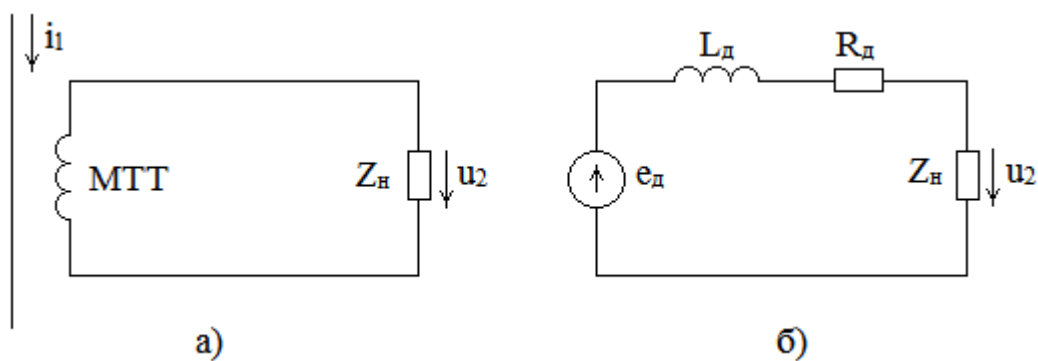


Рисунок 33 – Принципиальная схема (а) и расчетная (б) схемы магнитного трансформатора тока с нагрузкой

На рисунке 34 показано типичное расположение МТТ на подстанции. Как правило, они устанавливаются на фундаменте разъединителя защищаемой линии под фазными проводами или подвешиваются к ним на фиксированном расстоянии. Фазные провода расположены в горизонтальной плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа. Их центры находятся на оси $D_n - D_n$. Магнитные трансформаторы тока расположены так, что их оси $x - x$ и $y - y$ находятся в плоскости чертежа, а оси $z - z$ перпендикулярны плоскости чертежа.

Их центры находятся, как правило, на линии $x_d - x_d$, совпадающей с осями $x - x$ МТТ. Линия $x_d - x_d$ параллельна линии $D_{II} - D_{II}$ и находится от нее на расстоянии l_{II} , минимально необходимом по условиям изоляции МТТ от проводов линии. Расстояние между проводами линии равно D .

У МТТ крайних фаз (МТТ - А и МТТ - С) углы ориентации на провод ближней фазы (это провод фазы В) одинаковы и равны:

$$\alpha_1 = \arctg(D/l_{II}) \quad (59)$$

Расстояния до провода ближней фазы у них тоже одинаковы и равны:

$$l_1 = \sqrt{D^2 + l_{II}^2} \quad (60)$$

Углы ориентированы на провод дальней фазы, одинаковы и равны:

$$\alpha_2 = \arctg(2D/l_{II}) \quad (70)$$

Расстояния до провода дальней фазы одинаковы и равны:

$$l_1 = \sqrt{4D^2 + l_{II}^2} \quad (80)$$

К числу основных задач, решаемых при конструировании МТТ и для проектирования его установки на подстанции, относится задача обеспечения достаточно малых коэффициентом помех. МТТ считается пригодным для применения в схемах релейной защиты без всяких компенсаторов помех при условии, что коэффициенты помех от токов других фаз, других линий и тока в земле не превышают 0,05-0,07. Это значит, что амплитуда ЭДС в обмотке МТТ, создаваемая любым мешающим током, не должна превышать 5—7 % от амплитуды ЭДС, создаваемой таким же первичным током. В противном случае ЭДС помехи должна компенсироваться. Компенсация помехи от тока в данном проводе осуществляется при помощи другого МТТ, для которого мешающий ток является первичным. В простейшем случае используется МТТ с таким же M_e , но установленный так, что установочный коэффициент относительно провода с мешающим током.

Другой, более универсальный способ компенсации помех основан на применении суммирующего операционного усилителя. На рисунке 35 приведена схема взаимной компенсации помех, создаваемых токами ближней и дальней фаз у трех МТТ, установленных согласно рисунку 34. Здесь используются три суммирующих инвертирующих усилителя А1 - А3 и три инвертирующих усилителя А4 - А6 с коэффициентами усиления ЭДС МТТ, равными 1.

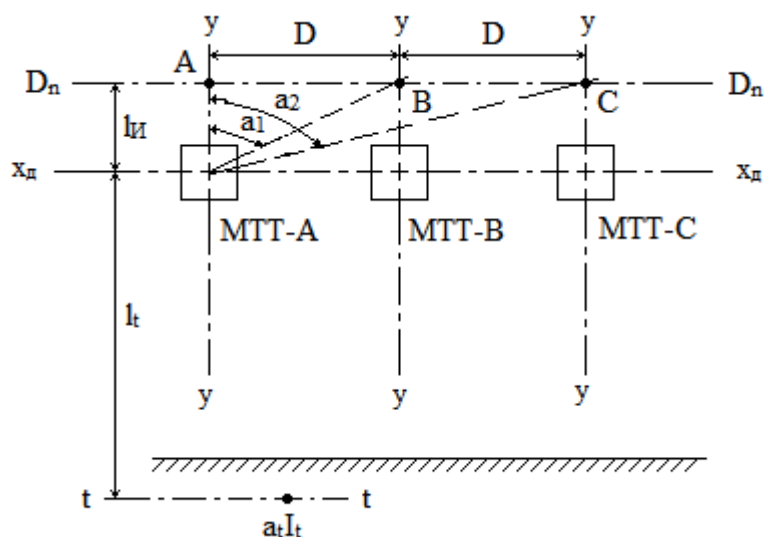


Рисунок 34 – Расположение фазных МТТ в открытой части подстанции 35-220кВ

На подстанции с одним заземленным силовым трансформатором по такому же принципу возможно скомпенсировать и помеху, создаваемую током в заземляющем устройстве подстанции. Для этого еще один, четвертый МТТ устанавливается вблизи ближайшей полосы заземляющего устройства, причем таким образом, чтобы основная составляющая его ЭДС была пропорциональна току в заземляющем устройстве.

Обмотка этого МТТ присоединяется к усилителям A_1 , A_2 , A_3 через три отдельных одинаковых масштабных резистора. Однако подбор этих резисторов связан с рядом технических трудностей, так как требуется знать распределение тока заземляющего устройства между его полосами и влияние его на фазные МТТ.

Если же на подстанции установлено несколько заземленных силовых трансформаторов, то подобная “схемная” компенсация помех от тока в заземляющем устройстве однозначно неосуществима, так как распределение тока заземляющего устройства между полосами неоднозначно - оно зависит от того, какие именно силовые трансформаторы включены в работу.

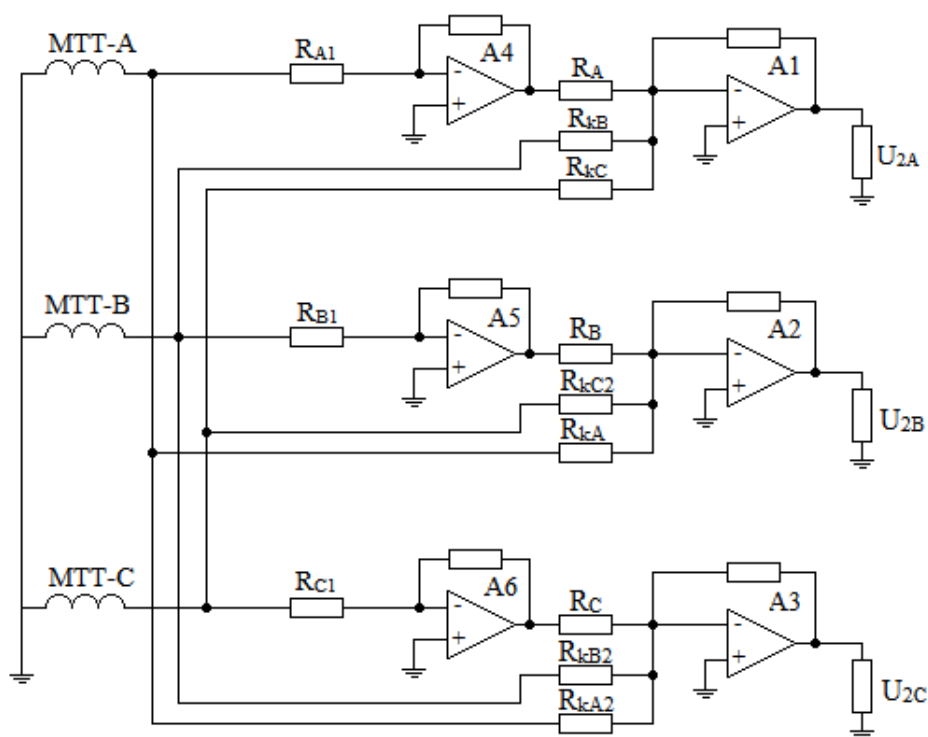


Рисунок 35 – Схема компенсации помех фазных МТТ от токов двух других фаз

Если МТТ плохо защищен от помех, создаваемых током в заземляющем устройстве, то в защите от междофазных КЗ целесообразно применять по два МТТ на каждый комплект защиты, установленные на разных фазах и включенные в неполный треугольник. При этом на входе устройства защиты помехи отдельных МТТ взаимно вычитаются.

В защитах же нулевой последовательности должны применяться только МТТ, хорошо защищенные от помех, создаваемых током в заземляющем устройстве подстанции.

2.4 Выводы

1. Появление МК в технике позволило решить ряд задач: увеличить ресурс и срок службы коммутационных аппаратов; максимально унифицировать элементную базу и упростить коммутационные аппараты; повысить их быстродействие; устранить воздействие на область

контактирования как окружающей среды, так и продуктов, образующихся в процессе работы коммутационных аппаратов.

2. МК не требуют специальных источников питания, не критичны к окружающей температуре, совмещают в себе функции измерительного и аналого-дискретного преобразователей, измерительного преобразователя и токового реле и при этом не нуждаются в трансреакторах и выпрямителях в отличие от аналогичных реле тока на интегральных элементах.

3. Результаты обзора показали, что МТТ считается пригодным для применения в схемах релейной защиты. Эти трансформаторы тока не имеют громоздких ферромагнитных сердечников и дорогой изоляции, а аналогичные устройства для кабельных линий вообще не имеют ферромагнитных элементов, что в свою очередь сильно удешевляет конструкцию защит.

3 Защита от замыканий на землю на герконах и катушках индуктивности

3.1 Разработка защиты на герконах и катушках индуктивности

Традиционно, при реализации защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), в сетях с изолированной нейтралью, используются обычные

трансформаторы тока [38]. Однако такие трансформаторы дороги, так как в них используется громоздкий ферромагнитный сердечник и дорогая изоляция для защиты измерительных обмоток от напряжения сети. В тоже время известны защиты воздушных линий, в которых используются магнитные трансформаторы тока [39]. Эти трансформаторы тока не имеют громоздких ферромагнитных сердечников и дорогой изоляции. Аналогичные устройства [1] для кабельных линий вообще не имеют ферромагнитных элементов. Однако из-за их значительных размеров и малой отдаваемой мощности, которую следует передавать на значительное расстояние, известные магнитные трансформаторы тока (МТТ) широкого применения не получили. В этой работе предлагается ряд конструкций магнитных трансформаторов тока и защит с их использованием, которые лишены некоторых из перечисленных недостатков [25].

В сетях с большими токами замыкания на землю можно использовать МТТ с герконом, конструкция которого приведена на рисунке 36.

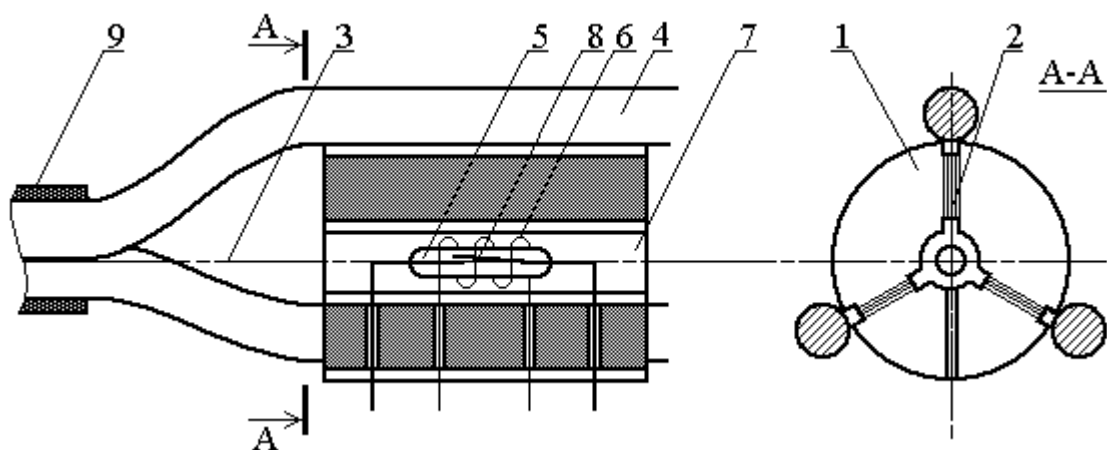


Рисунок 36 – Конструкция МТТ с герконом

Корпус 1 МТТ выполняют из изоляционного немагнитного материала в виде полого цилиндра в соответствии с рисунком 37. Измерительная обмотка выполнена в виде трех катушек 2, намотанных в пазы на корпусе 1. Плоскости этих катушек проходят через ось 3 вращения корпуса и развернуты относительно друг друга на 120 и 240 геометрических градусов. В результате катушки 2 и проводники 4 кабеля образуют трехфазную симметричную систему. Катушки МТТ могут соединяться согласно – параллельно или согласно – последовательно. В качестве выходного реле в ряде защит от ОЗЗ используется геркон 5, который имеет обмотку 6. Их закрепляют в отверстии корпуса 7. При этом контакты 8 геркона присоединяют к цепи отключения выключателя как показано на рисунке 38,а.

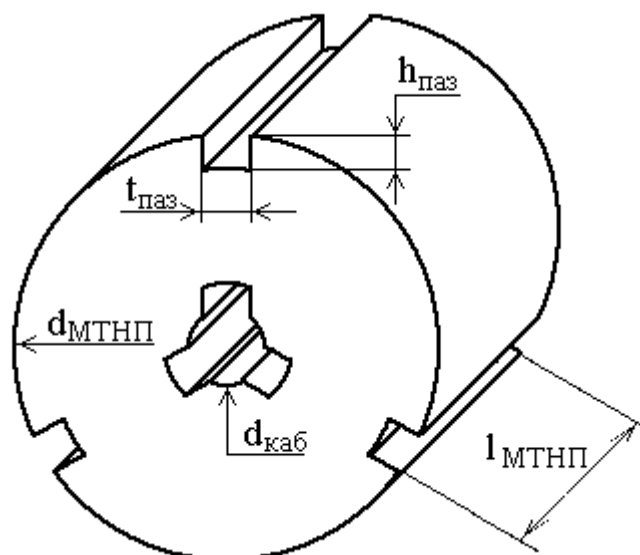


Рисунок 37 – Корпус из изоляционного немагнитного материала

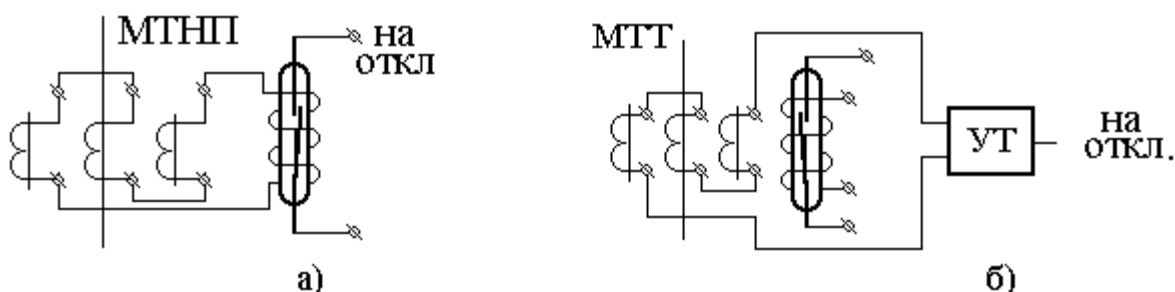


Рисунок 38 – Схемы защит от ОЗЗ на МТТ с герконом

При установке МТТ жилы 4 кабеля 9 должны располагаться на внешней поверхности полого цилиндрического корпуса параллельно его аксиальной оси 3. В этом случае МТТ вставляют и закрепляют между раздвинутыми проводниками 4 силового кабеля. Класс изоляции позволяет использовать МТТ в сетях с напряжением 0,4-6кВ [40].

Даже простое сопоставление традиционно используемых защит от ОЗЗ и предлагаемых технических решений позволяет сделать вывод о том, что последние менее металлоемки, а следовательно значительно более дешевые.

Работа устройства основанна на том, что проводники сети питания и три последовательно соединенные измерительные катушки в данном техническом решении представляют собой симметричную трехфазную систему. Поэтому в эксплуатационном режиме ток в обмотке геркона и напряженность магнитного поля в точке размещения его контактов будут равны нулю.

При замыкании на землю одной фазы сети, фазное напряжение поврежденной фазы относительно земли становится равным нулю, а напряжение неповрежденных фаз увеличивается в 1,73 раза. В результате появляются токи нулевой последовательности. При этом ток в обмотке геркона и напряженность магнитного поля в точке размещения его контактов будут не равны нулю.

Таким образом, использование МТТ с герконом позволяет реализовать следующие виды релейной защиты от однофазного замыкания на землю:

1. Защиту на герконе (рисунок 36);
2. Защиту на герконе с подмагничиванием (рисунок 38,а);
3. Защиту с измерительными катушками (рисунок 38,б).

В соответствии со схемой на рисунке 36, реагирующим органом на токи ОЗЗ является геркон, который срабатывает при достижении напряженности магнитного поля H_n от этих токов величины $H_{ср}$. В этот момент контакты геркона замыкаются и выдают сигнал о срабатывании защиты. В любом эксплуатационном режиме работы H_n всегда равна нулю.

Если при этом чувствительность защиты оказывается недостаточной, с помощью постоянного тока $I_{пдм}$ в обмотке геркона создается дополнительное поле подмагничивания. Его величина регулируется сопротивлением R .

Другим способом повысить чувствительность защиты от ОЗЗ на МТТ это использовать в качестве источника информации измерительные катушки. Однако мощность, отдаваемая МТТ, мала. Поэтому при реализации защиты от ОЗЗ для передачи сигнала от измерительных катушек МТТ предлагается использовать простой и дешевый усилитель тока, который должен иметь относительно линейную характеристику.

3.2 Усилители тока

В состав большинства схем релейной защиты и автоматики входят усилители сигналов. Чаще всего задачу усиления сигналов решают за счет управления интенсивностью процесса в одной из частей схемы звена усиления (в рабочей цепи) изменением интенсивности процесса в другой части этого же звена (цепи управления). Естественно, при этом рабочая цепь должна содержать дополнительный источник энергии и управляемые элементы, позволяющие изменять интенсивность процесса в данной цепи под воздействием управляющего сигнала.

Простейшая схема усилителя электрических сигналов может быть представлена как последовательное соединение сопротивления нагрузки $Z_{нагр}$ и сопротивления z , вносимого в цепь управляемыми элементами. Сопротивления $Z_{нагр}$ и z подключены к дополнительному источнику энергии (источнику питания усилителя). При $Z_{нагр} = \text{const}$ характеристики интенсивности процесса в рабочей цепи зависят от величины сопротивления z и параметров источника питания усилителя. Если источник питания выбран, то, изменяя величину z , можно управлять интенсивностью процесса в рабочей цепи.

Управляемые элементы конструируют таким образом, чтобы интенсивность процесса в управляющей цепи была значительно меньше интенсивности процесса в рабочей цепи. Так, например, если характеристиками интенсивности являются токи обеих цепей, то ток управления I_u меньше тока

нагрузки $I_{\text{нагр}}$. Можно интенсивность процесса характеризовать напряжением, приложенным к цепи управления U_y , и напряжением на нагрузке $U_{\text{нагр}}$. В качестве характеристики интенсивности можно использовать и мощность усиленного сигнала P_y , и мощность нагрузки $P_{\text{нагр}}$.

В практически осуществляемых устройствах релейной защиты и автоматики возникает необходимость в увеличении уровня какой либо из характеристик интенсивности (тока, напряжения или мощности). В зависимости от этого устройства усиления сигналов делят на усилители тока, усилители напряжения и усилители мощности. Количественно возможность каждого из усилителей принято характеризовать коэффициентами усиления. Для усилителей тока, напряжения и мощности используют коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности соответственно:

$$r_I = \Delta I_{\text{нагр}} / \Delta I_y ; \quad (80)$$

$$r_U = \Delta U_{\text{нагр}} / \Delta U_y ; \quad (81)$$

$$r_P = r_I r_U . \quad (82)$$

По устройству усилители сигналов различают в зависимости от характера изменения усиленного сигнала во времени. Так, например, при непрерывном изменении усиленного сигнала в области инфранизких частот интенсивность процесса в рабочей цепи увеличивается усилителями постоянного тока, чувствительными или нечувствительными к полярности усиленного сигнала. Если усиленный сигнал - переменный в области низких частот, то интенсивность процесса в нагрузке повышается усилителями переменного тока. При сигналах в виде импульсов разных форм и полярности интенсивность процесса увеличивается импульсными усилителями.

Усилители сигналов различают также по типу используемых управляемых элементов. Для усилителей электрических сигналов преимущественно используют полупроводниковые приборы, электронные лампы и магнитные элементы. Если усилители построены на базе полупроводниковых приборов, они называются полупроводниковыми усилителями', на базе электронных ламп - ламповыми усилителями, на базе магнитных элементов - магнитными усилителями. Часто усилители сигналов содержат управляемые элементы различных типов, например магнитные и полупроводниковые элементы - магнитополупроводниковые усилители сигналов. Широкое развитие получила технология изготовления интегральных схем на базе полупроводниковых кристаллов. На их основе также выполняются усилители сигналов — интегральные усилители.

Как любое звено системы автоматического управления и регулирования, усилители сигналов обладают определенными статическими и динамическими характеристиками. Статические характеристики - это равновесные установившиеся состояния усилителей, а динамические переходные процессы от одного установившегося состояния до другого.

В усилителях практически важна связь между усиливаемым сигналом и сигналом нагрузки. Первый сигнал можно рассматривать как причину изменения второго. Поэтому усиливаемый сигнал обычно называется входным ($x_{вх}$), а сигнал нагрузки, являющийся следствием усиливаемого, выходным ($x_{вых}$). Функциональная связь между сигналами:

$$x_{вых} = f(x_{вх}) \quad (83)$$

и будет уравнением статики, или статической характеристикой усилителя. В простейшем случае статическая характеристика описывается линейной функцией

$$x_{вых} = x_0 + r_y x_{вх} . \quad (84)$$

Часто уравнение статики записывают в виде отклонений от некоторого начального состояния

$$\Delta x_{вых} = r_y \Delta x_{вх} , \quad (85)$$

освобождаясь тем самым от свободного члена x_0 . Для обобщенного анализа иногда используют запись уравнения статики в безразмерной форме. Для этого выбирают некоторые базовые значения для $x_{вх}$ и $x_{вых}$ и вводят рассмотрение относительные отклонения

$$\xi_{вх} = \Delta x_{вх} / x_{бвх} ; \xi_{вых} = \Delta x_{вых} / x_{бвых} . \quad (86)$$

Выбор $x_{бвх}$ и $x_{бвых}$ произволен. Однако для каждого конкретного случая существуют наиболее рациональные базовые величины, позволяющие представить как уравнение статики, так и его решение в более удобном для анализа виде. Например, если величины $x_{бвых}$ и $x_{бвх}$ принадлежат статической характеристике (84), а свободный член $x_0 = 0$.

Тогда:

$$x_{бвых} = r_y x_{бвх} . \quad (87)$$

Поделив уравнение (85) на (87), получим:

$$\xi_{вых} = \xi_{вх} . \quad (88)$$

Графически уравнение (88) при равных масштабах для $\xi_{вых}$ и $\xi_{вх}$ в системе ортогональных координат представляет собой прямую, проходящую под углом 45° к осям координат.

Динамические характеристики усилителей сигналов, как и других звеньев систем управления и регулирования, могут быть определены при помощи

передаточной функции. Передаточная функция - это отношение изображений по Лапласу (L) зависимостей выходной и входной величин от времени:

$$W(p) = \frac{L[x_{\text{вых}}(t)]}{L[x_{\text{вх}}(t)]}. \quad (89)$$

В выражении (89) заменен символ A на x.

Если, ПП описывается линейным дифференциальным уравнением

$$(1 + T_p)L(x_{\text{вых}}) = r_y L(x_{\text{вх}}), \quad (90)$$

То передаточная функция его:

$$W(p) = r_y / (1 + T_p), \quad (91)$$

т. е., передаточная функция не зависит от входной величины $x_{\text{вх}}(t)$.

Переходная функция, соответствующая передаточной функции (91), имеет экспоненциальный характер:

$$h(t) = L^{-1}\left[W(p)\frac{1}{p}\right] = r_y(1 - e^{-t/T}), \quad (92)$$

поэтому при внезапном изменении входной величины значение выходной изменяется от установившегося значения x_{01} до x_{02} по выражению:

$$x_{\text{вых}} = x_{02} + (x_{01} - x_{02})e^{-t/T}. \quad (93)$$

Усилители сигналов, обладающие линейными статическими и динамическими характеристиками, называются линейными. Практически такими свойствами обладают усилители только в определенном диапазоне изменения входных и выходных величин. В общем случае статические характеристики усилителей не являются линейными функциями из-за наличия в них элементов с насыщением, зоной нечувствительности, мертвым ходом и т.д.

Для увеличения коэффициентов усиления, а также для улучшения динамических свойств усилителей часто используют обратную связь. Обратная связь представляет собой устройство, позволяющее передать часть выходного сигнала на вход усилителя. Если при этом дополнительный входной сигнал зависит только от величины выходного сигнала, но не зависит от времени, обратная связь будет жесткой (рисунк 39). Коэффициент $r_{0.с}$, определяющий долю выходной величины, подаваемой на вход усилителя, называется коэффициентом обратной связи. Сигнал $r_{0.с} x_{\text{вых}}$ может совпадать или быть противоположенным по направлению и сигналом $x_{\text{вх}}$. В первом случае на имеем положительную, а во втором – отрицательную обратную связь.

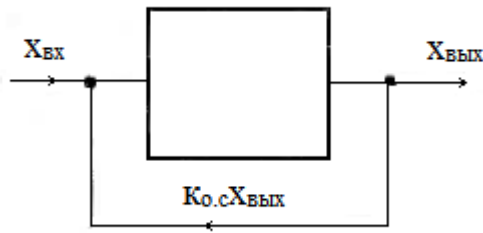


Рисунок 39 – Структурная схема звена обратной связи

Влияние обратной связи на статическую характеристику усилителя рассмотрим на примере линейного усилителя. Его статическая характеристика при наличии жесткой обратной связи имеет вид:

$$\Delta x_{\text{вых}} = r_y (\Delta x_{\text{вх}} \pm r_{o.c} \Delta x_{\text{вых}}) . \quad (94)$$

Определяя $\Delta x_{\text{вых}}$ из (94) получаем:

$$\Delta x_{\text{вых}} = |r_y / (1 \pm r_{o.c} r_y)| \Delta x_{\text{вх}} , \quad (95)$$

Результирующий коэффициент усиления становится равным:

$$r_{\Sigma} = r_y / (1 \pm r_{o.c} r_y) . \quad (96)$$

Из равенства (96) следует, что положительная обратная связь увеличивает результирующий коэффициент усиления, а отрицательный – уменьшает его.

Зависимость статической характеристики от величины коэффициента обратной связи (рисунок 40). Здесь положительная обратная связь вводится только в некотором диапазоне значений выходной величины $x_{\text{вых}2} \geq x_{\text{вых}} \geq x_{\text{вых}1}$. При $r_{o.c} r_y < 1$ (рисунок 40,а) на участке bc коэффициент усиления более высокий, чем на остальных участках статической характеристики, и равен r_{Σ} . Чем ближе $r_{o.c} r_y$ к единице, тем более крутым становится отрезок bc (угол $a = \arctg r_{o.c} r_y$ приближается к значению $\pi/2$).

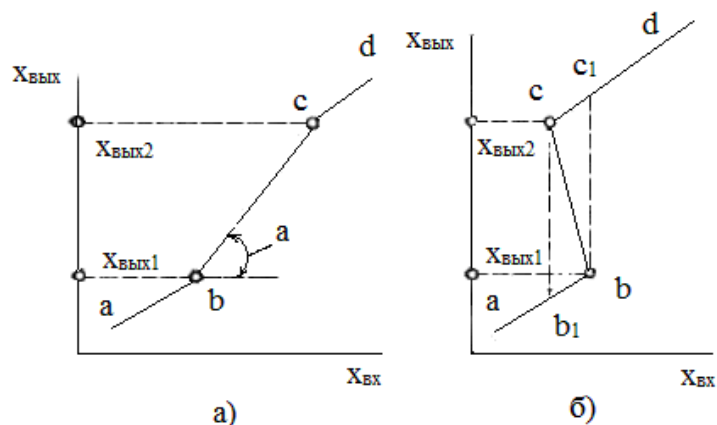


Рисунок 40 – Зависимость статической характеристики звена от коэффициента обратной связи

Для переходного процесса в усилителе, описываемого линейным дифференциальным уравнением первого порядка (90), при наличии жесткой обратной связи :

$$r_y(\Delta x_{\text{вх}} \pm r_{o.c} \Delta x_{\text{вых}}) = (1 + T p) \Delta x_{\text{вых}} . \quad (97)$$

выражение (97) после объединения членов с $\Delta x_{\text{вых}}$ и $\Delta x_{\text{вх}}$ и деления на величину $(1 \pm r_{o.c} r_y)$ можно записать в следующем виде:

$$(1 + T_{\Sigma} p) \Delta x_{\text{вых}} = r_{\Sigma} \Delta x_{\text{вх}} \quad (98)$$

где :

$$T_{\Sigma} = \frac{T}{1 \pm 1 \pm r_{o.c} r_y} ; \quad r_{\Sigma} = \frac{r_y}{1 \pm r_{o.c} r_y} \quad (99)$$

Следовательно, введение жесткой положительной обратной связи приводит к увеличению, как коэффициента усиления ($r_{\Sigma} > r_y$), так и инерционности ($T_{\Sigma} > T$). Противоположное действие оказывает жесткая отрицательная обратная связь.

Жесткая обратная связь может осуществляться по току и напряжению рабочей цепи. При этом сигнал обратной связи может быть включен параллельно или последовательно с входным сигналом.

Улучшить качество переходного процесса и повысить устойчивость усилителей сигналов можно с помощью г и б к о й обратной связи. Она служит для введения на вход усилителя сигнала, пропорционального скорости изменения выходной величины (первой производной от выходной величины по времени) или интегралу от входной величины. Практически гибкая обратная связь осуществляется с помощью дифференцирующих и интегрирующих устройств. Такая обратная связь оказывает влияние только на динамические характеристики усилителей сигналов.

Выбор той или иной обратной связи зависит от того, для каких целей используется усилитель сигналов. Однако во всех случаях введение положительной обратной связи увеличивает передаточный коэффициент. Более того, при коэффициентах обратной связи, больших единицы, в усилителе может возникать релейный или автоколебательный режим. Увеличение передаточного коэффициента за счет положительной обратной связи сопровождается снижением быстродействия, повышением погрешности, ослаблением устойчивости работы усилителя. Обратное действие оказывает отрицательная обратная связь. При использовании в усилителях управляемых элементов с высокими коэффициентами усиления глубокая отрицательная обратная связь становится одним из лучших средств обеспечения стабилизации режимов работы, как отдельных элементов, так и всего усилителя в целом.

Наибольшее распространение получил усилительный каскад, выполненный на биполярном транзисторе и включенный по схеме с общим эмиттером (рисунок 41). Источник входного переменного напряжения E_r с внутренним сопротивлением R_r связан с усилительным каскадом через разделительную емкость C_1 . Выходной сигнал через емкость C_2 подается на сопротивление нагрузки $R_{нагр.}$ или на вход следующего каскада. Широкое распространение емкостной связи между каскадами обусловлено прежде всего ее простотой. Недостаток такой связи - соединение двух каскадов с помощью емкости - не позволяет согласовать высокое выходное сопротивление предыдущего каскада с низким входным сопротивлением последующего.

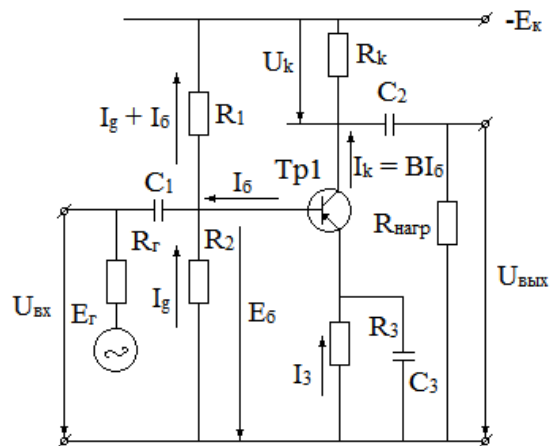


Рисунок 41 – Схема усилительного каскада

Реализовать построение защиты на МТНП можно и в традиционной форме. В этом случае реле защиты выносятся в релейный шкаф, а сигнал с МТНП к нему передают по контрольному кабелю с помощью усилителя низкой частоты. Усилитель размещается во внутреннем отверстии МТНП. Что позволяет передавать сигнал от МТНП до реле по двухпроводному кабелю и избежать наводок в цепи реле. Схема такой реализации защиты приведена на рисунок 43. Использование усилителя низкой частоты позволяет не только без искажений передавать сигнал, но и его усиливать. Что, в свою очередь, позволяет еще повысить чувствительность защиты.

Мощность, отдаваемая МТНП, мала. Поэтому при реализации защиты от ОЗЗ для передачи сигнала от МТНП предлагается использовать простой и дешевый «микрофонный» усилитель с практически линейной характеристикой, схема которого приведена на рисунке 42.

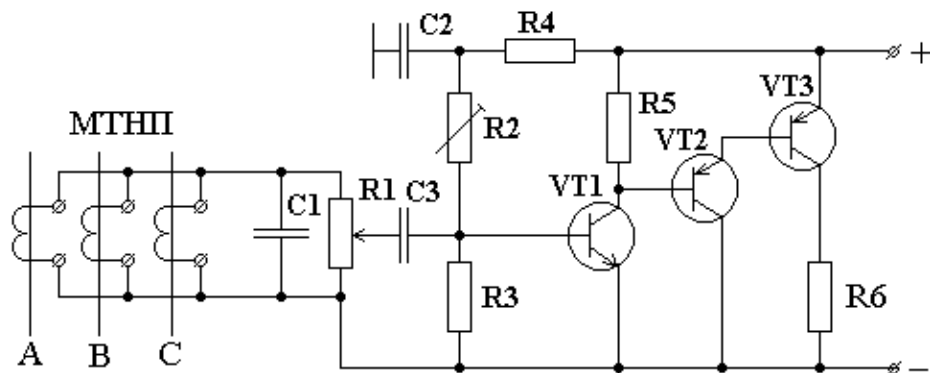


Рисунок 42 – Схема усилителя низкой частоты

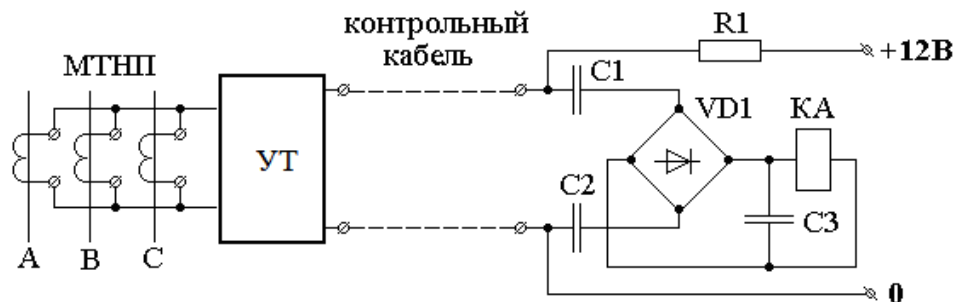


Рисунок 43 – Схема защиты от ОЗЗ на МТНП и усилителя низкой частоты

3.3 Выбор порога срабатывания защит

При токе $I_{\text{пдм}}=0$ напряженность магнитного поля области контактов геркона может определяться по закону Био-Савара-Лапласа как

$$H_{\text{п}} = I_{\text{озз}} / 2\pi r_{\text{г}}, \quad (100)$$

где $I_{\text{озз}}$ - ток ОЗЗ; $r_{\text{г}}$ - расстояние от геркона до проводников фаз.

Если принять $r_{\text{г}}=0,02\text{м}$, а напряженность $H_{\text{ср}}$ магнитного поля срабатывания геркона КЭМ-5 равной 2838А/м , то защита будет срабатывать при токе ОЗЗ

$$I_{\text{сз}} = H_{\text{п}} 2\pi r_{\text{г}} = 2 * 2838 * 3,14 * 0,02 = 357\text{А}.$$

То есть такая защита будет обладать очень низкой чувствительностью. Ее легко повысить если использовать подмагничивание геркона. Величину тока подмагничивания $I_{\text{пдм}}$ выбирают такой, чтобы напряженность подмагничивающего магнитного поля обмотки геркона $H_{\text{пдм}}$ равнялась примерно $(0,9 - 0,99)H_{\text{ср}}$. В этом случае напряженность магнитного поля области контактов геркона

$$H_{\text{г}} = H_{\text{п}} + H_{\text{пдм}}. \quad (111)$$

Напряженность магнитного поля катушки в области воздушного зазора контактов геркона

$$H_{\text{пдм}} \approx I_{\text{пдм}} w_{\text{пдм}} / r_1, \quad (112)$$

где $r_1 = \sqrt{(d_{\text{кг}} / 2)^2 + (h_{\text{пдм}} / 2)^2}$;

$w_{\text{пдм}}$, $d_{\text{пдм}}$ и $h_{\text{пдм}}$ - число витков, диаметр и длина обмотки подмагничивания геркона.

С учетом подмагничивания $0,99H_{\text{ср}}$ защита будет срабатывать при токе

$$I_{\text{сз}} = (H_{\text{г}} - H_{\text{пдм}}) 2\pi r_1 = 2 \times 142 \times 3,14 \times 0,02 = 3,5 \text{ А}. \quad (113)$$

В соответствии с рисунком 38,б ЭДС на выходе МТТ при ОЗЗ определяется как сумма ЭДС трех, последовательно соединенных, измерительных катушек индуцированных замыкания токами $I_{\text{А}}$, $I_{\text{В}}$ и $I_{\text{С}}$ в фазах кабеля соответственно. Наиболее просто это осуществить определять ЭДС МТНП от каждой фазы отдельно по расчетной модели на рисунке 44.

По этой расчетной модели ЭДС МТНП, например, от тока $I_{\text{п}}$ в проводнике фазы определяется как сумма ЭДС трех, последовательно соединенных, измерительных катушек индуцированных током $I_{\text{п}}$ в бесконечном проводнике при углах $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$ и $\alpha_3 = -30^\circ$ соответственно. Как видно из рисунка 44 при фиксированном значению α координаты:

$$x_{\text{к}} = h_{\text{к}} / 2 \cos \alpha \text{ и } y_{\text{к}} = x_{\text{к}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (114)$$

а угол:

$$\beta = \arctg x_{\text{к}} / (y_{\text{п}} - y_{\text{к}}).$$

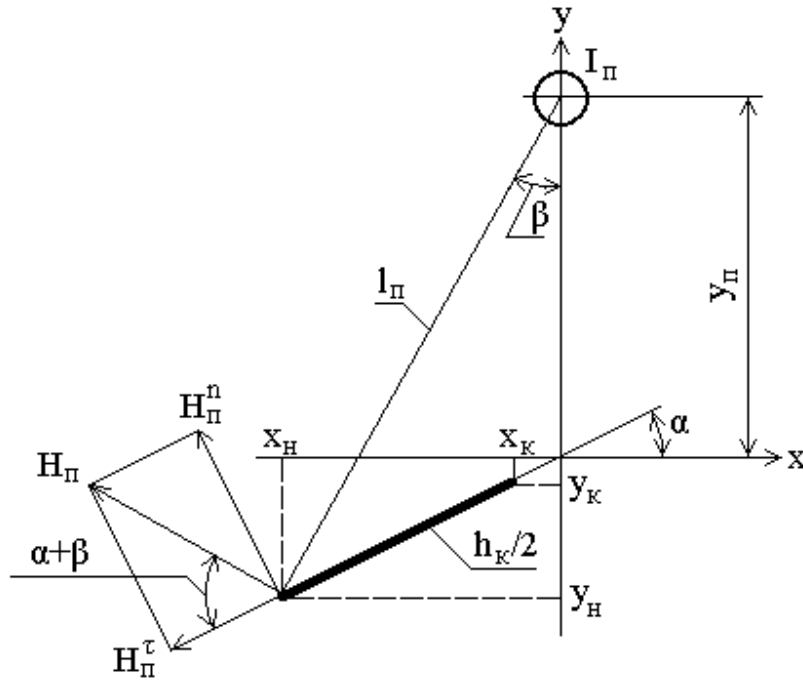


Рисунок 44 – Величина ЭДС МТНП с наружным размещением кабеля в зависимости от места ОЗК в обмотки статора

Расстояние от проводника до точки на плоскости катушки с координатами x_k и y_k определяется как

$$l_n = \sqrt{x_k^2 + (y_n - y_k)^2}, \quad (115)$$

а напряженность магнитного поля H_n и ее нормальная составляющая H_n^n в ней равны соответственно:

$$H_n = \frac{I_n}{2\pi l_n} \text{ и } H_n^n = H_n \sin(\alpha + \beta).$$

После подстановки в это уравнение можно получить

$$H_n^n = \frac{I_n}{2\pi \sqrt{x_k^2 + (x_k \tan \alpha + y_n)^2}} \sin(\alpha + \arctg \frac{x_k}{y_k + y_n}).$$

В результате магнитный поток через измерительную катушку с углом α можно определить как

$$\Phi_k = \mu \mu_0 l_k \int_{-x_k}^{x_k} H_n^n dx = \frac{\mu \mu_0 l_k I_n}{2\pi} \int_{-x_k}^{x_k} \frac{\sin(\alpha + \arctg \frac{x_k}{x_k \tan \alpha + y_n})}{\sqrt{x_k^2 + (x_k \tan \alpha + y_n)^2}} dx;$$

а ее амплитудное значение ЭДС катушки и ЭДС обмотки МТНП от проводника фазы

$$E_k = 2\pi\Phi_k w_k f_c \text{ и } E_{\text{МТП}} = 2\pi(\Phi_{k1} + \Phi_{k2} + \Phi_{k3})w_k f_c, \quad (116)$$

где Φ_{k1} , Φ_{k2} и Φ_{k3} - магнитный поток, который пересекает плоскости соответственно первой, второй и третьей измерительных катушек;

w_k - число витков в измерительной катушке;

f_c - частота тока в сети.

При этом амплитудное значение ЭДС обмотки МТП от токов всех фаз:

$$E_{\text{МТП}} = E_{\text{МТП,А}} + E_{\text{МТП,В}} + E_{\text{МТП,С}}.$$

На рисунке 45,а приведена полученная расчетным путем кривая зависимости ЭДС на выходе МТТ от величины тока ОЗЗ. Она получена для МТТ из трех катушек от промежуточного реле РП26. В качестве линии использовался кусок трехжильного кабеля.

3.4 Экспериментальные данные исследования устройства защиты кабельных линий

Экспериментальные данные получены на стенде, который приведен на рисунке 46. Основой этого стенда является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АО-31-4. Из каждой фазной обмотки АД через равные промежутки сделано по 11 выводов. Сеть с изолированной нейтралью моделируется с помощью трех соединенных в звезду конденсаторов емкостью 10мкф, что обеспечивает ток замыкания на землю $I_k = 2,3\text{А}$. Однофазное замыкание на корпус машины имитировалось путем замыкания нейтральной точки «звезды» конденсаторов на один из выводов обмотки АД.

Экспериментальные значения ЭДС МТП на рисунке 44 представлены точками. Из рисунка видно, что погрешность моделирования не превышает 15% в самом неблагоприятном случае.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовался осциллограф на базе персонального компьютера.

Экспериментальные данные в виде осциллограмм тока I_C фазы С и ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ на выходе МТТ в режимах последовательно пуска, нагрузки при скольжении $s = 0,019$ и ОЗЗ путем замыкания одиннадцатого вывода обмотки фазы С статора АД АД-31-4 при токе замыкания на корпус $I_k = 2,3\text{А}$ приведены на рисунке 46.

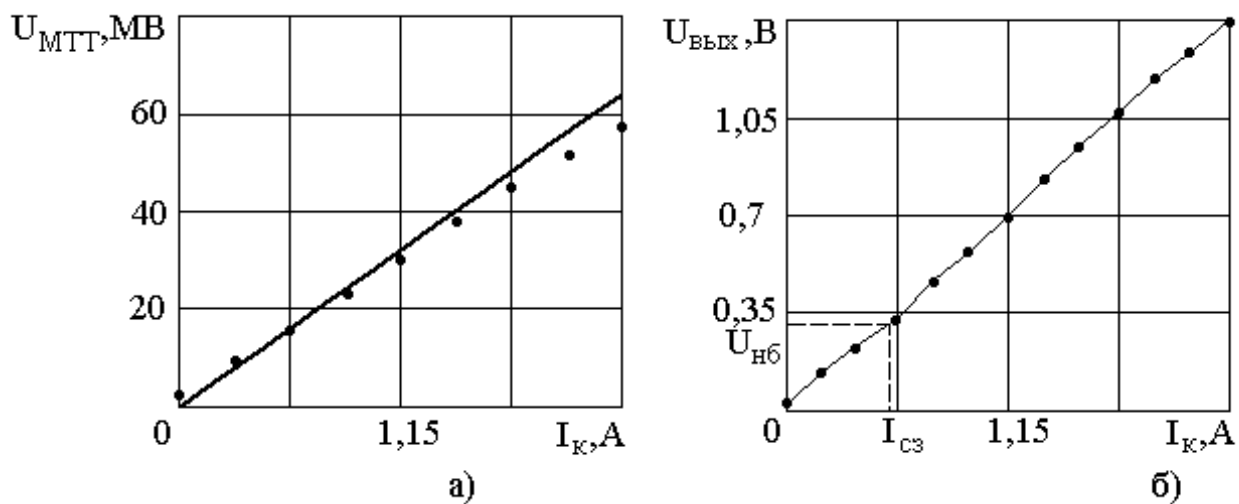


Рисунок 45 – Величина ЭДС МТНП с кабелем внутри в зависимости от места ОЗЗ в обмотки статора



Рисунок 46 – Экспериментальный стенд и опытный вариант МТНП

При построении устройства защиты от ОЗЗ использовался типовой усилитель тока с коэффициентом усиления $k_T = 22,2$. Экспериментально полученная зависимость напряжения на выходе УТ от тока ОЗЗ приведена на рисунке 45,б.



Рисунок 47 – Осциллограммы пуска, холостого хода и ОЗЗ АД АО-31-4

Чувствительность защиты ограничена величиной небаланса $U_{нб}$ вызываемой влиянием магнитных полей, вызываемых рядом расположенных силовых кабелей или электрических машин. В экспериментах $U_{нб}$ моделировалась с помощью мощного индуктора, представленного в виде разомкнутого магнитопровода с катушкой и проводником с током 150А. Они способны создавать магнитное поле в 0,05-0,3Тл на расстоянии 0,1-0,5м от МТТ. Результаты эксперимента показали, что $U_{нб}$ при таком внешнем воздействии не превышает 0,22В.

Напряжение срабатывания защиты определяется как

$$U_{сз} = k_{отс} U_{нб},$$

где $k_{отс}$ - коэффициент отстройки, учитывающий неточности расчета, нелинейности УТ и изменение влияния внешних магнитных полей. Его следует принимать равным 1,1-1,4.

В соответствии с рисунком 45 при коэффициенте отстройки $k_{отс} = 1,3$ ток срабатывания защиты составляет $I_k = 0,54А$.

3.5 Выводы

1. Предложенные магнитные трансформаторы тока с герконами позволяют реализовать три различных типа защиты от ОЗЗ. Их можно устанавливать на кабели любого диаметра.

2. Предложенный метод моделирования ЭДС на выходе такого магнитного трансформатора тока, что позволяет определять ее с погрешностью не превышающей 15%.

3. Чувствительность защиты ограничена влиянием магнитных полей от расположенных рядом силовых кабелей с током и работающих электрических машин. В результате чего защита срабатывает только при токах ОЗЗ превышающих 0,5А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведен анализ известных технических решений, выявлены их недостатки и предложено новое решение актуальной научной задачи – разработки защиты от однофазных замыканий на землю кабельных линий в сетях с изолированной нейтралью. Что дает возможность построения защиты от замыканий на землю более чувствительной, недорогой и надежной ввиду более простой конструкции. Результаты работы:

разработан специальный трансформатора тока нулевой последовательности;

проведена оценка чувствительности разработанной защиты;

разработана конструкции корпуса позволяющая располагать на нем три катушки индуктивности и закрепить геркон с обмоткой, так, чтобы на него не действовали магнитные поля создаваемые жилами кабеля.

Показано, что для выделения тока нулевой последовательности необходимо располагать плоскость катушки индуктивности на корпусе относительно двух других под углом 120 и 240 геометрических градусов. Причем ось этих катушек должна располагаться по касательной к окружности проведенной плоскости перпендикулярной продольному расположению токопровода соответствующей фазы, что позволяет катушки измерять производить измерение непосредственно только своей фазы. В случае необходимости повысить чувствительность защиты можно за счет подмагничивания геркона. Для чего на геркон наматывают дополнительную обмотку.

Разработана методика выбора порога срабатывания защит от ОЗЗ на МТТ, что позволяет рассчитывать ток уставки с погрешностью не превышающей 15%.

Предложенный метод моделирования электродвижущей силы магнитного трансформатора нулевой последовательности дает возможность рассчитать его параметры;

Разработанная защита от замыкания на землю, позволяет выявлять замыкания с токами от 0,54А.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
- 2 Чернобровов Н.В. Релейная защита. 4-ое изд. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.
- 3 Берман И., Крипски А., Скалка М. Защит мощных генераторов, работающих в блоке с трансформаторами, от замыканий на землю в обмотке статора. – В сб.: Релейная защита и противоаварийная автоматика. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ – 72) / Под. ред. В. М. Ермоленко, Е. Д. Зейлидзона и А. М. Федосеева. – М.: Энергия, 1975, с. 19 – 26.
- 4 Вильгейм Р., Уотерс М. Замыкание нейтрали в высоковольтных системах. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 145 с.
- 5 Сирота И.М. Защита от замыканий на землю в электрических системах. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 208 с.
- 6 Кискачи В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП – 1 (описание, наладка, эксплуатация). – М.: Энергия 1972. – 73 с.
- 7 Сирота И.М., Масляник В.В. Сигнализация и защита электродвигателей напряжением выше 1000 В от однофазных замыканий на землю в компенсированных сетях (Техническая информация). – Киев: Изд-во АН УССР, 1971. – 48 л.
- 8 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. –М.: Высшая школа. 1967. – 775 с.
- 9 Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И. Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6кВ собственных нужд электростанций с помощью ОПН // Электрические станции, 1991. №4. С. 78-84.
- 10 Кузьмичева К.И., Подъячев И.Н., Шлейфман И.Л. Ограничение перенапряжений при отключении вакуумными выключателями пусковых токов электродвигателей с помощью ОПН // Электрические станции. 1996. №4. С. 45-49.
- 11 Крючков И.П., Кувшинский Н.Н., Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. –М.: Энергия, 1978. -454 с.
- 12 Новожилов А.Н., Исупова Н.А., Колесников Е.Н., Кудабаяев Д.А., Черных В.А. Вестник ПГУ. 2010. №4, – С. 67-74.
- 13 Правила устройств электроустановок. Астана, 2012. 478с.
- 14 Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. 2 кн. Кн 1. Производство и распределение электрической энергии / Под. общ. ред. проф. МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. 7-е изд., испр. И доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880с.
- 15 Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов. 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006 – 639 с.
- 16 Дарченко В. Е., Степков Т. В. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях // Электричество. 1956. №2
- 17 Шуть В.В. Защита от замыканий на землю // Одесское книжное издательство, 1959.

- 18 Борухман В. А. Об эксплуатации селективных защит от замыкания на землю в сетях 6-10кВ и мероприятия по их совершенствованию // Энергетик. 2000. № 1. С. 20-21.
- 19 Бухтояров В. Ф., Токарев Г.И., Удавихин В. И. Устройство для направленной защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-35кВ. // Электр. станции. 1996. № 6. С. 57-59.
- 20 Головкин С. И., Вайнштейн Р. А., Юдин С. М. Селективная защита однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 30, 35кВ // Электр. станции. 2000. № 7. С. 33-36
- 21 Нудельман Г. С., Шевелев В. С. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6-35кВ. // Энергетик. 2001. № 3.. С. 32-33
- 22 Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10кВ. / Р. А. Вайнштейн, С. И. Головкин, В. С. Григорьев и др. // Электр. станции. 1998. № 7. С. 26-30.
- 23 Головкин С. И., Вайнштейн Р. А., Албул В. Н. Условия селективной работы защиты с наложением контрольного тока при перемежающихся дуговых замыканиях // Изв. вузов. Энергетика. 1988. № 7. С. 22-26.
- 24 Сирота И. М. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Госэнергоиздат. 1962.
- 25 Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б.. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ.-М. : Энергоатомиздат, 1987.- 248с.
- 26 Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А. Основы техники релейной защиты. - М.: Энергоатомиздат, 1984.- 375с.
- 27 Вавин В.Н. Трансформаторы тока. – М.: Энергия, 1966. - 104 с.
- 28 Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. – 2-е изд. М.: Энергия, 1977. – 104 с.
- 29 Казанский В.Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. – 2-е изд. М.: Энергия, 1969. – 184 с.
- 30 Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П., Григорьев М.Н. Максимальная токовая защита с магнитными трансформаторами тока. – М.: Энергоиздат, 1981. – 56 с.
- 31 Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
- 32 Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М.: Энергия, 1965. – 240 с.
- 33 Нудельман Г.С., Шамс М.А. Быстродействующее реле тока для защиты от замыканий на землю. – Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения, 1981, вып. 1(92), с. 13.
- 34 Modern Reed Relais. Die neuesten Entwicklungen auf dem Sector der Relais mit trockenen und benetzten Kontakten // Electrotechnik ISSN 0322-9025. Vol. 39, № 11, 1988. S. 93-96.

- 35 Максимальные частоты коммутации, адекватные условиям разового режима управления для отечественных терконов / В. Н. Шоффов, С. Х. Хромов, В. Н. Чичерюкин, С. В. Давыдов // Электротехника, 1991, № 1. С. 33-34
- 36 Клецель М.Я., Мусин В.В. Выбор тока срабатывания максимальной токовой защиты без трансформаторов тока на герконах.// Промышленная энергетика, 1990. №4, С. 32-36.
- 37 Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П., Григорьев М.Н. Максимальная токовая защита с магнитными трансформаторами тока. – М.: Энергоиздат, 1981. – 56 с.
- 38 Андреев В.А., Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение».- 3 изд. Перераб. и доп.-М.: высш. шк., 1991.-496с.
- 39 Боровиков В.А., Косарев В.К., Ходот Г.А., Электрические сети энергетических систем. Учебник для техникумов. Изд. 3-е, перераб. Л., «Энергия», 1977г.- 393с.
- 40 Новожилов А.Н., Кудабаев Д.А., Колесников Е.Н, Черных В.А.. Инновационный патент №25699 KZ, H02H 7/06; 7/08, Оpubл. 16.04.2012, бюл.№12. Устройство защиты электроустановки от однофазного замыкания.
- 41 Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. изд. дом. Интеллект, 2011. – 408 с.
- 42 Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурной И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench. Том 1. –М.: Изд-во «Додэка», 2001.- 304с.
- 43 http://rza.org.ua/rza/view/Zashchita-ot-odnofaznih-zamikaniy-na-zemlyu-v-seti-s-izolirovannoy-neytralyu_21.html
- 44 <http://www.toehelp.ru/theory/toe/contents.html>
- 45 <http://www.adp.ru/UPS/>