

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ГУМАНИТАРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Черноусова Л.В.

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Учебно-методические рекомендации по выполнению курсовой
работы для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»

Черкесск
2018

УДК
ББК
Ч

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроснабжение».

Протокол № 4 от « 27 » 02 2018 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СевКавГГТА.

Протокол № _____ от « _____ » _____ 2018 г.

Рецензенты: **Хабаров А.В.** - начальник службы технической эксплуатации и организации ремонтов КЧФ ПАО «МРСК Северного Кавказа»

Ч00 Черноусова, Л.В., Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: учебно-методические рекомендации по выполнению курсовой работы для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»/ Л.В.Черноусова. - Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2018.-23 с.

Настоящие рекомендации содержат требования к структуре курсовой работы по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», приведены примеры расчета и выполнения графического материала.

УДК
ББК

© Черноусова Л.В., 2018
© ФГБОУ ВО СевКавГГТА, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 РАСЧЕТ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ УЧАСТКА СЕТИ 10 кВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	5
1.1 Расчёт токов междуфазных коротких замыканий	5
1.2 Учёт подпитки места КЗ синхронными и асинхронными двигателями.....	7
1.3 Выбор схемы соединения измерительных трансформаторов тока (ТТ), и конкретного типа защитного устройства.....	8
2 РАСЧЁТ УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ.....	10
2.1 Рассчитаем ток срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).....	11
2.2 Проверка измерительных трансформаторов тока на 10% полную погрешность.....	12
2.3 Проверка защищаемого оборудования на термическую стойкость	12
2.4 Определение необходимости использования устройств противоаварийной автоматики (АПВ, АВР, АЧР).....	13
3 РАЗРАБОТКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	15
3.1 Постановка задачи.....	15
3.2 Расчёт токов междуфазных коротких замыканий	16
3.3 Расчёт токовой отсечки без выдержки времени	18
3.4 Расчёт тока срабатывания отсечки с выдержкой времени.....	19
3.5 Расчёт тока срабатывания защиты от симметричных перегрузок	19
3.6 Расчёт тока срабатывания защиты от небольших перегрузок.....	20
3.7 Расчёт уставок защиты асинхронного двигателя от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).....	20
3.8 Построение защитной характеристики реле «Сириус-21-Л» и схемы его подключения	21
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	23

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения дисциплины “Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем” являются:

- изучение принципов построения защиты электроэнергетических объектов от токов короткого замыкания, сверхтоков, различных ненормальных режимов;
- расчет и выбор уставок устройств релейной защиты и автоматики;
- выбор типовых систем релейной защиты объектов электроэнергетических сетей;
- изучение принципов работы и настройки цифровых и аналоговых реле защиты;
- разработка предложений по совершенствованию защиты электроэнергетических объектов промышленных предприятий;
- разработка предложений по повышению устойчивости функционирования устройств релейной защиты.

При этом задачами дисциплины являются:

- сформировать у обучающихся способность к анализу работы релейной защиты в электроэнергетических системах;
- научить обучающихся рассчитывать и выбирать релейную защиту в различных схемах электроснабжения.

В курсовой работе необходимо рассчитать релейную защиту участка сети промышленного предприятия. Исходные данные выбираются из ранее выполненных курсовых проектов по дисциплинам «Электрические станции и подстанции» и «Системы электроснабжения городов и промышленных предприятий».

1 РАСЧЕТ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ УЧАСТКА СЕТИ 10 кВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Рассмотрим случай, когда требуется спроектировать релейную защиту и автоматику на участке сети промышленного предприятия. Схема рассматриваемого участка приведена на рисунке 1.1.

На рисунке 1.1 показано, что к шинам центрального распределительного пункта (ЦРП) через высоковольтный выключатель Q1 подключается кабельная линия (фидер), выполненная кабелем ААБ 3х50. Длина кабельной линии 0,5 км. От кабельной линии получает питание понижающий цеховой трансформатор Т, типа ТМГ-1000/10 со схемой соединения обмоток Δ/Ун-11. Присоединение трансформатора к линии – глухое. Со стороны 0,38 кВ трансформатора установлен вводной автоматический выключатель типа «Электрон». Трансформатор Т может работать в режиме резервирования нагрузки соседней секции II (которая условно показана штриховой линией), при этом параллельная работа двух трансформаторов секций I и II исключается.

Для использования схемы на рисунке 1.1 в качестве расчётной наносим на неё такие данные как сопротивление системы, удельные сопротивления кабельной линии, напряжение КЗ и потери КЗ цехового трансформатора. При помощи этих данных вычисляем максимальные и минимальные токи КЗ в характерных точках сети, величины этих токов также наносим на схему, в числителе приводим величину наибольшего тока трёхфазного КЗ, а в знаменателе величину наименьшего тока двухфазного КЗ. Токи КЗ приводим к напряжению 10 кВ, при этом рассчитывается периодическая составляющая тока КЗ в момент времени $t=0с$.

1.1 Расчёт токов междуфазных коротких замыканий

Вначале определим сопротивления (приведённые к 10 кВ) элементов схемы замещения, которая вследствие её элементарности не приводится.

Трансформатор Т. Активное сопротивление:

$$r_T = \frac{P_K U_{НОМ.Т}^2}{S_{НОМ.Т}^2} = \frac{12000 \cdot 10,5^2}{1000^2} = 1,32 \text{ Ом},$$

здесь P_K -потери КЗ трансформатора в Вт, $S_{НОМ.Т}$ -номинальная полная мощность в кВА, и $U_{НОМ.Т}$ –наибольшее рабочее напряжение трансформатора соответствующее среднему напряжению источника питания для расчёта токов КЗ, кВ.

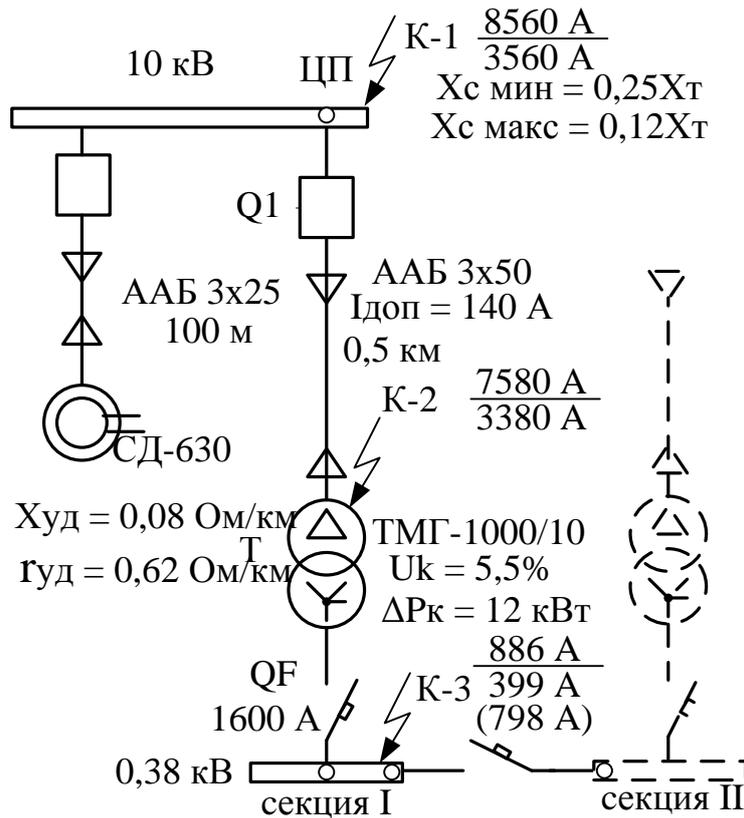


Рисунок 1.1 - Схема участка сети промышленного предприятия

Индуктивное сопротивление:

$$x_T = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{100P_k}{S_{\text{ном.т}}}\right)^2} \cdot \frac{10 U_{\text{ном.т}}^2}{S_{\text{ном.т}}} = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 12}{1000}\right)^2} \cdot \frac{10 \cdot 10,5^2}{1000} = 5,9 \text{ Ом,}$$

здесь u_k -напряжение КЗ в %, P_k -потери КЗ, но уже в кВт.

Сопротивления кабельной линии:

$$x_{\text{кл}} = x_{\text{уд}} \cdot l = 0,08 \cdot 0,5 = 0,04 \text{ Ом,}$$

$$r_{\text{кл}} = r_{\text{уд}} \cdot l = 0,62 \cdot 0,5 = 0,31 \text{ Ом,}$$

где $x_{\text{уд}}$ и $r_{\text{уд}}$ -удельное индуктивное и активное сопротивления (Ом/км) кабельной линии.

Индуктивное сопротивление системы в минимальном и максимальном режимах, заданное в долях от индуктивного сопротивления понижающего трансформатора:

$$x_{\text{с.мин}} = 0,25x_T = 0,25 \cdot 5,9 = 1,48 \text{ Ом,}$$

$$x_{\text{с.макс}} = 0,12x_T = 0,12 \cdot 5,9 = 0,71 \text{ Ом.}$$

Максимальный ток трёхфазного КЗ в точке К-1:

$$I_{\text{к1макс}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma\text{к1макс}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,71} = 8,5 \text{ кА,}$$

здесь $Z_{\Sigma\text{к1макс}} = x_{\text{с.макс}} = 0,71 \text{ Ом.}$

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-1:

$$I_{K1\text{мин}}^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{2 \cdot Z_{\Sigma K1\text{мин}}} = \frac{10,5}{2 \cdot 1,48} = 3,55 \text{ кА},$$

здесь $Z_{\Sigma K1\text{мин}} = x_{\text{с.мин}} = 1,48 \text{ Ом}$.

Аналогично находятся токи междуфазных КЗ в точках К-2 и К-3.

Максимальный ток трёхфазного КЗ в точке К-2:

$$I_{K2\text{макс}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} Z_{\Sigma K2\text{макс}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,8} = 7,58 \text{ кА},$$

где $Z_{\Sigma K2\text{макс}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{с.макс}} = 0,31 + j0,04 + j0,71 = 0,31 + j0,75 \text{ Ом}$,

$Z_{\Sigma K2\text{макс}} = \sqrt{0,31^2 + 0,75^2} = 0,8 \text{ Ом}$.

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-2:

$$I_{K2\text{мин}}^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{2 \cdot Z_{\Sigma K2\text{мин}}} = \frac{10,5}{2 \cdot 1,55} = 3,38 \text{ кА},$$

где $Z_{\Sigma K2\text{мин}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + jx_{\text{с.мин}} = 0,31 + j0,04 + j1,48 = 0,31 + j1,52 \text{ Ом}$,

$Z_{\Sigma K2\text{мин}} = \sqrt{0,31^2 + 1,52^2} = 1,55 \text{ Ом}$.

Максимальный ток трёхфазного КЗ в точке К-3, приведённый к стороне 10 кВ:

$$I_{K3\text{макс}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} Z_{\Sigma K3\text{макс}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 6,85} = 0,885 \text{ кА},$$

$Z_{\Sigma K3\text{макс}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + r_{\text{т}} + jx_{\text{т}} + jx_{\text{с.макс}} = 0,31 + j0,04 + 1,32 + j5,9 +$

$j0,71 = 1,63 + j6,65 \text{ Ом}$, $Z_{\Sigma K3\text{макс}} = \sqrt{1,63^2 + 6,65^2} = 6,85 \text{ Ом}$.

Минимальный ток двухфазного КЗ в точке К-3, приведённый к стороне 10 кВ. В двух фазах:

$$I_{K3\text{мин}}^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{2\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma K3\text{мин}}} = \frac{10,5}{2\sqrt{3} \cdot 7,6} = 0,399 \text{ кА}.$$

В одной фазе:

$$I_{K3\text{мин}}^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma K3\text{мин}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 7,6} = 0,798 \text{ кА},$$

$Z_{\Sigma K3\text{мин}} = r_{\text{кл}} + jx_{\text{кл}} + r_{\text{т}} + jx_{\text{т}} + jx_{\text{с.мин}} = 0,31 + j0,04 + 1,32 + j5,9 + j1,48 =$

$1,63 + j7,42 \text{ Ом}$, $Z_{\Sigma K3\text{мин}} = \sqrt{1,63^2 + 7,42^2} = 7,6 \text{ Ом}$.

1.2 Учёт подпитки места КЗ синхронными и асинхронными двигателями

Синхронные двигатели.

Начальный сверхпереходный ток от синхронного двигателя определяется по формуле:

$$I_{\text{с.д}}^{//} = \frac{E_{*н.д}^{//}}{\sqrt{(x_{*н.д}^{//} + x_{*вн})^2 + r_{*вн}^2}} \cdot I_{н.д},$$

где внешние сопротивления $x_{*вн}$ и $r_{*вн}$ приведены к номинальной мощности двигателя; приведение производится по формуле:

$$x_{*вн} = x_{вн} \cdot \frac{S_{нд}}{U_{ср}^2};$$

$$r_{*вн} = r_{вн} \cdot \frac{S_{нд}}{U_{ср}^2},$$

где $x_{вн}$ и $r_{вн}$ - в Ом; $S_{нд}$ - номинальная мощность двигателя, МВА; $U_{ср}$ - среднее номинальное напряжение электрической ступени, кВ.

Значения $E''_{*н.д}$ принимаются равными:

- для недозабужденного синхронного двигателя 0.9;
- для перевозбужденного синхронного двигателя 1.1.

Начальный сверхпереходный ток от синхронного двигателя 630 кВт, где $x''_{*н.д} = 0,15$, $x_{*вн} = 1,81$, $r_{*вн} = 0,075$ [4]

$$I''_{с.д} = \frac{1,1}{\sqrt{(0,15 + 1,81)^2 + 0,075^2}} \cdot 42,72 = 23,9 \text{ А}$$

$$I_{ном \text{ СД}} = \frac{P_{ном \text{ СД}}}{\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi \eta} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9 \cdot 0,946} = 42,72 \text{ А.}$$

Максимальный ток короткого замыкания в точке К1 $I_{к1макс}^{(3)} = 8500 \text{ А}$, $8500 \text{ А} \gg 42,72 \text{ А}$, следовательно, подпитку СД можно не учитывать.

Асинхронные двигатели

Подпитка от асинхронных двигателей учитывается только при их суммарной мощности $S_{н\sum} > 1000 \text{ кВт}$ и если они находятся в непосредственной близости от места КЗ, причём влияние асинхронных двигателей учитывается только в ударном токе КЗ, поскольку ток КЗ от асинхронных двигателей затухает весьма быстро (в течение периодов). Следовательно, в нашем расчете подпитку от АД не учитываем.

1.3 Выбор схемы соединения измерительных трансформаторов тока (ТТ), и конкретного типа защитного устройства

Принимаем к установке микропроцессорное реле защиты «Орион-РТЗ», так как целесообразным является использование функции АПВ, которая заложена в алгоритм этого устройства. Устройство «Орион-РТЗ» подключается к выключателю по схеме дешунтирования реле тока мгновенного действия (РТМ), установленного в приводе выключателя. Схема соединения трансформаторов тока (ТТ) – неполная звезда с трансформаторами тока в фазах А и С рисунок 2.2. Коэффициент трансформации ТТ принимаем с запасом равным 200/5. Аварийное отключение выключателя Q1 осуществляется по средствам дешунтирования реле РТМ при помощи устройства «Орион-РТЗ», схема также приведена на рисунке 1.2.

Устройство защиты располагается в непосредственной близости от выключателя поэтому в расчётах, в соответствии общепринятой проектной практикой, можно принять сопротивление контрольного кабеля от ТТ до устройства защиты равным 0,05 Ом.

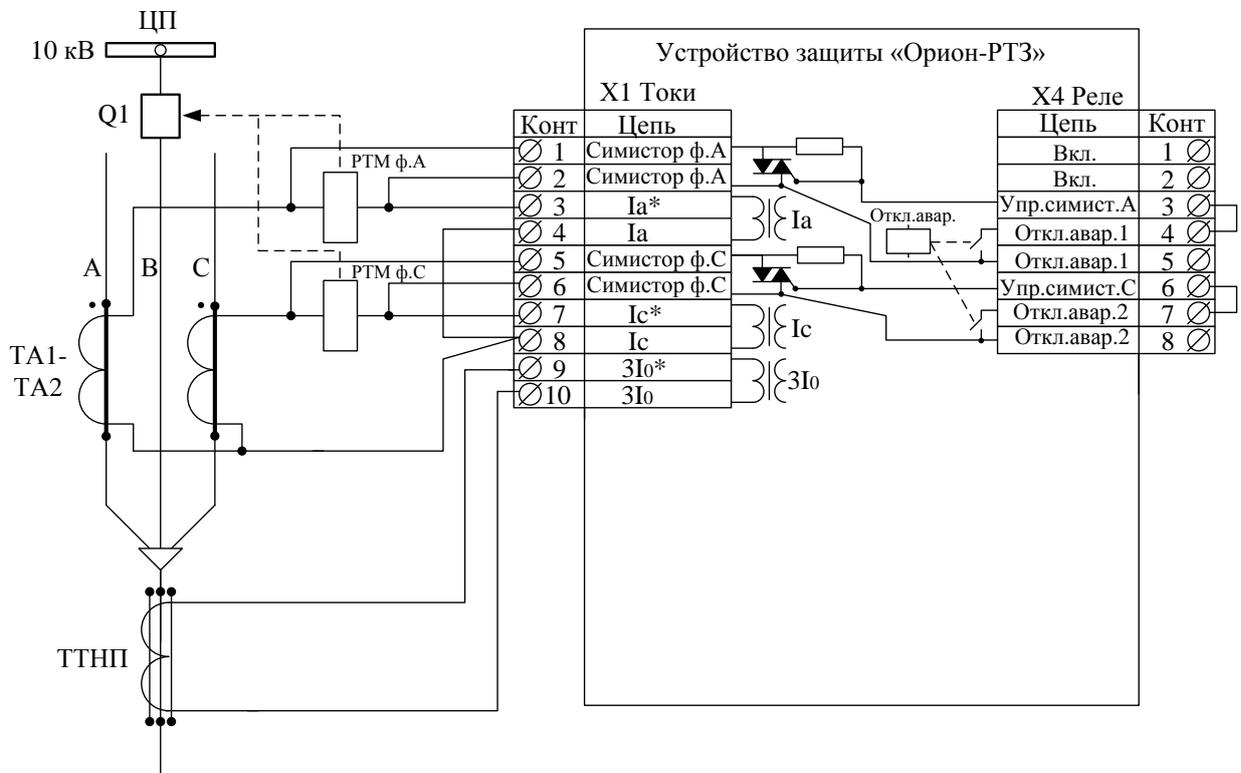


Рисунок 2.2 - Схема включения измерительных трансформаторов тока и цепей аварийного отключения высоковольтного выключателя от устройства защиты «Орион-РТЗ»

2 РАСЧЁТ УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КЗ

Ток срабатывания токовой отсечки. По условию отстройки от трёхфазного КЗ за трансформатором в максимальном режиме работы энергосистемы:

$$I_{с.о.} \geq k_{отс} I_{к3макс}^{(3)} = 1,15 \cdot 885 = 1018 \text{ А,}$$

$k_{отс} = 1,15$ – коэффициент отстройки токовой отсечки цифровых защит (для аналоговых защит $k_H = 1,25$).

По условию отстройки от броска намагничивающего тока защищаемого трансформатора:

$$I_{с.о.} \geq k_H I_{б.т.н.} = 1,15 \cdot 8 \cdot 58 = 534 \text{ А,}$$

где $I_{б.т.н.} = 8 \cdot I_{ном.т}$ – действующее значение броска тока намагничивания, А.

Принимаем большее значение $I_{с.о.} = 1018 \text{ А}$. Чувствительность токовой отсечки в месте её установки к минимальным двухфазным КЗ:

$$k_{с.о.мин}^{(2)} = \frac{I_{к1мин}^{(2)}}{I_{с.о.}} = \frac{3550}{1018} = 3,5 > 2,$$

чувствительность отсечки обеспечена.

В алгоритм действия защиты подлежит вводу значение тока срабатывания отсечки во вторичной величине, т.е.

$$I_{с.о.р.орион} = \frac{k_{сх} I_{с.о.}}{n_{тт}} = \frac{1 \cdot 1018}{200/5} = 25,45 \text{ А,}$$

где $k_{сх} = 1$ – коэффициент схемы для соединения трансформаторов тока (ТТ) в полную или неполную звезду (при соединении ТТ в треугольник или на разность токов двух фаз $k_{сх} = \sqrt{3}$); $n_{тт} = 200/5$ – номинальный коэффициент трансформации измерительных ТТ. Время срабатывания ступени отсечки, для уменьшения размеров возможных повреждений защищаемого оборудования, принимаем равным $t_{с.о.} = 0,05 \text{ с}$. Блокировку отсечки по второй гармонике не используем, так как ток её срабатывания выбран значительно большим, чем наибольший возможный бросок тока намагничивания.

Ток срабатывания ступени МТЗ. По условию отстройки от наибольшего рабочего тока защищаемого присоединения:

$$I_{с.з.} \geq \frac{k_{отс} k_{сзп}}{k_B} I_{ном.т} = \frac{1,1 \cdot 2,5}{0,9} 58 = 177 \text{ А,}$$

здесь $k_{отс} = 1,1$ – коэффициент отстройки ступени МТЗ цифровых защит (для аналоговых защит $k_{отс} = 1,25$); $k_{сзп} = 2,5$ – коэффициент самозапуска питаемой от трансформатора нагрузки; $k_B = 0,9$ – коэффициент возврата устройства «Орион-РТЗ».

По условию отстройки от наибольшего рабочего тока присоединения в режиме резервирования секции II:

$$I_{с.з.} \geq k_{отс} (k_{сзп} k_3 I_{ном.т} + k_3 I_{ном.т}) = 1,1 (2,5 \cdot 0,7 \cdot 58 + 0,7 \cdot 58) = 156 \text{ А,}$$

где $k_3 = 0,7$ – номинальный коэффициент загрузки трансформатора защищаемого присоединения.

Для облегчения согласования защиты «Орион-РТЗ» со стороны 10 кВ с защитой 0,4 кВ в виде автоматического вводного выключателя, в данном случае целесообразно отстроить ток срабатывания ступени МТЗ от тока срабатывания отсечки автоматического выключателя 0,4 кВ. Ток срабатывания отсечки автомата, приведённый к стороне 10 кВ, равен:

$$I_{с.о.авт.} = \frac{3I_{ном.авт.}}{k_T} = \frac{3 \cdot 1600}{25} = 192 \text{ А,}$$

где $I_{ном.авт.} = 1600 \text{ А}$ -номинальный ток вводного автоматического выключателя; k_T -коэффициент трансформации защищаемого силового трансформатора.

Тогда ток срабатывания ступени МТЗ по условию отстройки от ступени отсечки автоматического выключателя:

$$I_{с.з.} \geq k_{отс} I_{с.о.авт.} = 1,1 \cdot 192 = 211 \text{ А.}$$

Окончательно принимаем большее значение $I_{с.з.} = 211 \text{ А}$. Чтобы МТЗ защищала от перегрузки и измерительные ТТ, следует выбрать ТТ с большим коэффициентом трансформации, поэтому были приняты ТТ типа ТПЛ 200/5. В устройство защиты вводим ток срабатывания ступени МТЗ равный:

$$I_{с.мтз.р.орион} = \frac{k_{сх} I_{с.з.}}{n_{тт}} = \frac{1 \cdot 211}{200/5} = 5,28 \text{ А.}$$

Проверим чувствительность ступени МТЗ реле «Орион-РТЗ» к двухфазным КЗ на стороне 0,4 кВ в минимальном режиме:

$$k_{мин}^{(2)} = \frac{I_{кзмин}^{(2)}}{I_{с.з.}} = \frac{399}{211} = 1,9 \approx 2.$$

Таким образом, чувствительность МТЗ реле «Орион-РТЗ» достаточна в случае возникновения самого неблагоприятного случая КЗ (при однофазном КЗ на землю со стороны 0,4 кВ ток КЗ со стороны 10 кВ будет выше, чем при двухфазном КЗ, в связи с тем, что схема соединения обмоток трансформатора Δ/Y -н-11).

2.1 Рассчитаем ток срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

Собственный ёмкостный ток защищаемого фидера равен:

$$I_{с.фид.} = I_{с.уд.} l = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ А,}$$

где $I_{с.уд.}$ -удельный ёмкостный ток (А) для кабелей 10 кВ сечением 50 мм², определяется по справочным данным, l -длина кабельной линии, км.

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ:

$$I_{с.з.озз} \geq k_n k_{бр} I_{с.фид.} = 1,2 \cdot 2 \cdot 0,4 = 0,96 \text{ А,}$$

здесь $k_n = 1,2$ -коэффициент надёжности; $k_{бр} = 2$ -коэффициент броска ёмкостного тока при использовании цифровых защит.

В реле вводим значение тока срабатывания от ОЗЗ:

$$I_{с.з.03з \text{ орион}} = \frac{I_{с.з.03з}}{n_{\text{ТТНП}}} = \frac{0,96}{30} = 0,032 \text{ А,}$$

где $n_{\text{ТТНП}}$ -номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП).

2.2 Проверка измерительных трансформаторов тока на 10% полную погрешность

Проверим измерительные трансформаторы тока на полную 10% погрешность. Расчётная нагрузка на трансформаторы тока в случае трёхфазного КЗ в сети 10 кВ составит:

$$z_{\text{н.расч.}} = \sqrt{3}r_{\text{пр}} + z_{\text{р.орион}} + r_{\text{пер}} = \sqrt{3} \cdot 0,05 + 0,4 + 0,1 = 0,59 \text{ Ом,}$$

здесь $r_{\text{пр}} = 0,05 \text{ Ом}$ -сопротивление контрольных кабелей; $z_{\text{р.орион}} = 0,4 \text{ Ом}$ -сопротивление входных токовых цепей реле «Орион-РТЗ» с цепями дешунтирования, $r_{\text{пер}} = 0,1 \text{ Ом}$ -переходное сопротивление контактов и т.д.

В случае двухфазного КЗ расчётная нагрузка на ТТ увеличится и составит:

$$z_{\text{н.расч.}} = 2r_{\text{пр}} + z_{\text{р.орион}} + r_{\text{пер}} = 2 \cdot 0,05 + 0,4 + 0,1 = 0,6 \text{ Ом.}$$

Наибольшее допустимое сопротивление вторичных цепей трансформаторов тока при предельной кратности тока равной $k_{10} = \frac{1,1I_{с.о.}}{I_{\text{ном.ТТ}}} = \frac{1,1 \cdot 1018}{200} = 5,6$, составляет $z_{\text{доп}} \approx 1,8 \text{ Ом}$ (определяется из справочных данных по кривым предельной кратности). Так как $z_{\text{н.расч.}} < z_{\text{доп}}$, то ТТ работают с полной погрешностью менее 10%.

В режиме дешунтирования $z_{\text{н.расч.}}$ увеличивается на величину сопротивления реле РТМ, однако сопротивление этого реле в целом не превышает 1 Ом, поэтому $z_{\text{н.расч.}} < z_{\text{доп}}$, и трансформаторы тока работают с погрешностью не более 10%.

2.3 Проверка защищаемого оборудования на термическую стойкость

Минимально допустимое сечение кабельной линии оп условию термической стойкости:

$$S_{\text{мин}} = \frac{I_{\text{к1макс}}^{(3)} \sqrt{t_{\text{с.о.}} + t_{\text{выкл.}}}}{C_{\text{тер}}} = \frac{8500 \sqrt{0,05 + 0,1}}{90} = 36,6 \text{ мм}^2,$$

где $t_{\text{с.о.}}$ -время срабатывания отсечки реле «Орион-РТЗ»; $t_{\text{выкл.}}$ -время срабатывания реле РТМ и высоковольтного выключателя; $C_{\text{тер}} = 90 \frac{\text{А} \cdot \text{с}^{0,5}}{\text{мм}^2}$ специальный параметр, характеризующий термическую стойкость кабелей с алюминиевыми жилами напряжением до 10 кВ включительно.

Так как минимальное расчётное сечение кабельной линии по термической стойкости меньше реального сечения кабеля $36,6 < 50$ (ААБ 3х50), то термическая стойкость кабеля обеспечивается при наиболее тяжёлых повреждениях.

Проверим защищаемый трансформатор на термическую стойкость в случае трёхфазного КЗ на его выводах и отказе вводного выключателя со стороны 0,4 кВ. Для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками допустимая продолжительность прохождения тока КЗ не должна превышать величину:

$$t_{\text{доп}} < \frac{1500}{k^2}, \quad (1.2)$$

где k – кратность тока КЗ по отношению к номинальному току трансформатора, но при этом в соответствии с требованиями технической эксплуатации для трансформаторов 10(6) кВ длительность КЗ не должна превышать в самом тяжёлом случае 4 с.

$$\text{В нашем случае } t_{\text{доп}} \frac{1500}{(I_{\text{КЗмакс}}^{(3)}/I_{\text{ном.т}})^2} = \frac{1500}{(885/58)^2} = 6,4 \text{ с.}$$

следовательно, термическая стойкость силового трансформатора также обеспечена при таких повреждениях.

Длительно допустимый ток кабеля ААБ 3х50 равен $I_{\text{доп}} = 140$ А, при этом принятый ток срабатывания МТЗ $I_{\text{с.з.}} = 211$ А, таким образом $I_{\text{доп}} < I_{\text{с.з.}}$ и не обеспечивается защита кабеля от перегрузки ступенью МТЗ, в случае отказа выключателя 0,4 кВ. Аналогично не обеспечивается защита от перегрузки и силового трансформатора. Поэтому целесообразно ввести в действия ещё одну ступень МТЗ с действием на сигнал.

Ток срабатывания защиты от перегрузки:

$$I_{\text{с.з.пер.}} \geq \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{ном.т}} = \frac{1,1}{0,9} 58 = 71 \text{ А.}$$

В реле вводим значение тока срабатывания от перегруза:

$$I_{\text{с.пер.р.орион}} = \frac{k_{\text{сх}} I_{\text{с.з.}}}{n_{\text{тт}}} = \frac{1 \cdot 71}{200/5} = 1,8 \text{ А.}$$

Выдержка времени ступени от перегрузки $t_{\text{пер}} = 8$ с, в соответствии с практикой эксплуатации.

Таким образом, теперь обеспечена защита от перегрузки, как кабельной линии, так и силового трансформатора.

2.4 Определение необходимости использования устройств противоаварийной автоматики (АПВ, АВР, АЧР).

Необходимость использования тех или иных устройств противоаварийной автоматики диктуется категорией надёжности предприятия, а также нормативными документами по электроэнергетике. Так в соответствии с ПУЭ

устройствами АПВ оборудуются все одиночные трансформаторы мощностью более 1МВА.

В нашем случае рассматривается двухтрансформаторная цеховая подстанция с трансформаторами по 1 МВА. Использование АПВ целесообразно только в случае действия ступени МТЗ в зоне резервирования в сети 0,4 кВ. Поэтому в алгоритм реле «Орион-РТЗ» закладываем функцию АПВ при срабатывании ступени МТЗ. При работе отсечки АПВ не работает, чтобы не увеличивать разрушения в сети 10 кВ. АПВ задаём однократным. Также считаем, что от защищаемого трансформатора не питаются синхронные двигатели. Время срабатывания АПВ определяется несколькими условиями.

По условию готовности привода выключателя к включению:

$$t_{АПВ} \geq t_{г.п.} + t_{зап} = 0,2 + 0,5 = 0,7 \text{ с,}$$

где $t_{г.п.}$ - время готовности привода выключателя, определяется по техническим данным привода и обычно находится в диапазоне от 0,1 до 0,2 с., $t_{зап} = 0,5 \text{ с.}$ - время запаса.

По условию готовности выключателя:

$$t_{АПВ} \geq t_{г.в.} - t_{в.в.} + t_{зап} = 0,7 - 0,06 + 0,5 = 1,14 \text{ с,}$$

здесь $t_{г.в.}$ - время готовности выключателя, которое в зависимости от типа выключателя находится в пределах от 0,2 до 2с., $t_{в.в.}$ - время включения выключателя, которое находится по техническим данным на выключатель.

По условию деионизации дуги в месте КЗ:

$$t_{АПВ} = t_{д} + t_{зап} = 0,1 + 0,5 = 0,6 \text{ с,}$$

где $t_{д}$ - время деионизации среды в месте КЗ, его значение зависит от метеорологических условий, времени протекания и значения тока КЗ, ориентировочно для сетей напряжением до 35 кВ $t_{д} = 0,1 \text{ с,}$ для сетей 110 кВ $t_{д} = 0,17 \text{ с.}$

В случае использования на подстанции в качестве источника оперативного тока конденсаторных батарей выдержка времени АПВ должна быть больше времени $t_{зар}$, необходимого для заряда конденсаторов, разрядившихся при отключении КЗ,

$$t_{АПВ} = t_{зар} + t_{зап}.$$

Окончательно для нашего случая устанавливаем время срабатывания АПВ $t_{АПВ} = 1,2$.

Считаем, что питаемые от нашей подстанции потребители относятся ко второй категории надёжности, поэтому допустимо ручное включение резервного источника питания. В случае использования автоматического включения резерва (АВР), его уставки следует согласовывать с временем действия АПВ.

Уставки АЧР задаются энергосистемой, и в данном случае нами не рассматриваются.

3 РАЗРАБОТКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1 Постановка задачи

Требуется разработать релейную защиту асинхронного двигателя напряжением 10 кВ с короткозамкнутым ротором. Двигатель подключён к одной из секций 10 кВ центрального распределительного пункта промпредприятия. Расчётная схема приведена на рисунке 3.1. Электроснабжение предприятия осуществляется от главной понижающей подстанции (ГПП). На ГПП установлен понижающий трансформатор 115/10,5 кВ с номинальной полной мощностью $S_{Т.ном} = 16$ МВА и напряжением короткого замыкания $u_k = 10,5\%$. Питание от трансформатора Т главной понижающей подстанции (ГПП) подаётся на шины 10 кВ центрального распределительного пункта (ЦРП). К шинам 10 кВ ЦРП по средствам кабельной линии КЛ2 и высоковольтного выключателя Q4 подключен высоковольтный асинхронный двигатель М с короткозамкнутым ротором. Требуется разработать релейную защиту этого двигателя вместе со схемой подключения реле, проверить её надёжность, подобрать коэффициент трансформации трансформаторов тока. Защиту выполнить на цифровом отечественном терминале «Сириус-21-Л».

Таблица 3.1 - Характеристики АД

Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	КПД, η %	$\cos\varphi$	$k_{пуск}$	$S_{Т.ном},$ МВА	$x_{с мин}$	L кЛ2, м
А-500ХК-4У3	315	93,2	0,87	6,0	16	$0,1x_T$	100

Прим.: сопротивление системы $x_{с мин}$, в долях от сопротивления трансформатора Т, приведено для минимального режима её работы

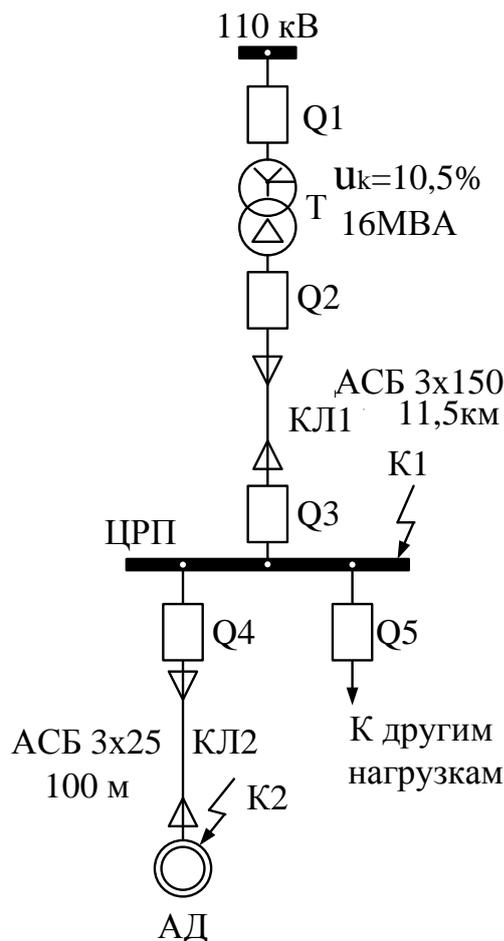


Рисунок 3.1 - Расчётная схема участка сети промышленного предприятия

3.2 Расчёт токов междуфазных коротких замыканий

Для оценки чувствительности защиты требуется знать минимальные токи двухфазных КЗ в месте установки защиты на выключателе Q4 в точке K1, и на выводах защищаемого асинхронного двигателя (АД) в точке K2. Таким образом, получаем элементарную схему замещения, приведенную на рисунке 3.2.

Индуктивное сопротивление трансформатора Т подстанции глубокого ввода, приведённое к 10 кВ составит:

$$X_T = \frac{u_k(\%) \cdot U_{T\text{ном}}^2}{100 S_{T\text{ном}}} = \frac{10,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 16} = 0,72 \text{ Ом.}$$

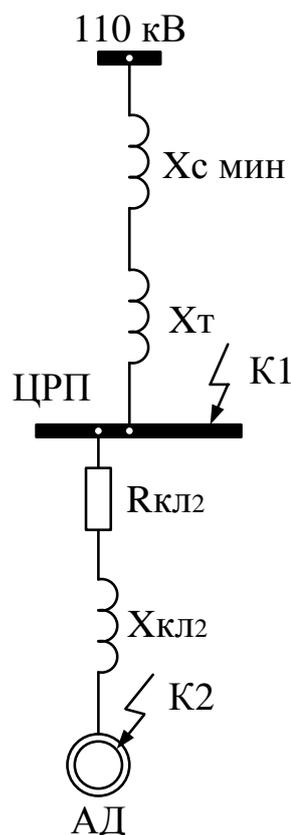


Рисунок 3.2 Схема замещения участка сети промышленного предприятия

Тогда сопротивление питающей энергосистемы в минимальном режиме $x_{c \text{ мин}} = 0,1x_T = 0,072 \text{ Ом}$.

Активное и индуктивное сопротивления кабельной линии КЛ1 находим по её удельным справочным данным, согласно которым для кабеля АСБ с жилами сечением 150 мм^2 , $r_{уд} = 0,2 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ и $x_{уд} = 0,079 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$. Тогда общее сопротивление кабельной линии КЛ1 длиной 11500 м (11,5 км) составит:

$$z_{кЛ1} = (r_{уд} + jx_{уд})l_{кЛ1} = (0,2 + j0,079)11,5 = 2,3 + j0,91 \text{ Ом}.$$

Активное и индуктивное сопротивления кабельной линии КЛ2 находим по её удельным справочным данным, согласно которым для кабеля АСБ с жилами сечением 25 мм^2 , $r_{уд} = 1,17 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ и $x_{уд} = 0,099 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$. Тогда общее сопротивление кабельной линии КЛ2 длиной 100 м (0,1 км) составит:

$$z_{кЛ2} = (r_{уд} + jx_{уд})l_{кЛ2} = (1,17 + j0,099)0,1 = 0,117 + j0,0099 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление до точки короткого замыкания К1 равно:

$$\begin{aligned} z_{к1} &= x_{c \text{ мин}} + x_T + r_{уд1} + jx_{уд1} = j0,072 + j0,72 + 2,3 + j0,91 \\ &= 2,3 + j1,702 \text{ Ом} \end{aligned}$$

$$z_{к1} = \sqrt{2,3^2 + 1,702^2} = 2,860 \text{ Ом}$$

Периодическая составляющая тока трёхфазного КЗ в точке К1 в момент времени $t = 0 \text{ с}$, равна

$$I_{к1 t=0}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}z_{к1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,86} = 1,83 \text{ кА.}$$

Ток двухфазного КЗ составит $I_{к1 t=0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,83 = 1,58 \text{ кА.}$

Определим токи двух- и трёхфазных КЗ в точке К2 на выводах асинхронного двигателя. Суммарное сопротивление до точки К2 равно:

$$\begin{aligned} z_{к2} &= r_{кЛ1} + r_{кЛ2} + x_{с \text{ мин}} + x_T + x_{кЛ2} + x_{кЛ1} = \\ &= 0,117 + j0,072 + j0,72 + j0,0099 + 2,3 + j1,702 = \\ &= 2,42 + j1,71 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока трёхфазного КЗ в точке К2 в момент времени $t = 0$ с, равна

$$I_{к2 t=0}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}z_{к2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2,42^2 + 1,71^2}} = 2,05 \text{ кА.}$$

Ток двухфазного КЗ составит $I_{к2 t=0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 2,05 = 1,775 \text{ кА.}$

3.3 Расчёт токовой отсечки без выдержки времени

Токовая отсечка без выдержки времени служит для защиты асинхронного двигателя от тяжёлых междуфазных КЗ на его выводах в клеммной коробке, или в обмотке статора. Ток срабатывания токовой отсечки отстраивается от броска пускового тока двигателя и определяется по выражению:

$$I_{с.о.} \geq I_{бр.пуск} = k_{апер} k_{пуск} I_{ном.дв.} = 1,8 \cdot 6 \cdot 21,36 = 231 \text{ А,}$$

где номинальный ток двигателя

$$I_{ном \text{ АД}} = \frac{P_{ном \text{ АД}}}{\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi \eta} = \frac{315}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,87 \cdot 0,932} = 21,36 \text{ А.}$$

Измерительные трансформаторы тока (ТТ) соединяем по схеме «неполная звезда», коэффициент трансформации ТТ выбираем 150/5. Тогда величина вторичного тока срабатывания отсечки, которая будет вводиться в алгоритм работы защиты составит:

$$I_{с.о. \text{ Сириус}} = \frac{k_{сх} I_{с.о.}}{k_{ТТ}} = \frac{1 \cdot 231}{150/5} = 7,7 \text{ А,}$$

здесь $k_{сх} = 1$ - для схемы соединения трансформаторов тока в «неполную звезду», $k_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Проверим чувствительность токовой отсечки к двухфазным КЗ в начале КЛ2 т.е. в месте установки защиты:

$$k_q^{(2)} = \frac{1580}{231} = 6,84 \gg 2,$$

и на выводах асинхронного двигателя:

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = \frac{1775}{231} = 7,7 \gg 2.$$

Видно, что отсечка надёжно защищает АД от тяжёлых междуфазных КЗ, так как $k_{\text{ч}}^{(2)}$ значительно выше 2.

3.4 Расчёт тока срабатывания отсечки с выдержкой времени

Отсечку без выдержки резервирует вторая ступень – токовая отсечка с выдержкой времени 0,1 с. Данная ступень может в некоторых случаях обеспечить эффективную защиту двигателя и от заклинивания ротора. Небольшое замедление вводится в защиту для отстройки от броска пускового тока. Ток срабатывания второй ступени находится по формуле

$$I_{\text{с.о.2}} = \frac{1,2k_{\text{пуск}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{ном АД}} = \frac{1,2 \cdot 6}{0,93} 21,36 = 165 \text{ А},$$

$k_{\text{в}} = 0,93$ – коэффициент возврата реле «Сириус-21-Л».

Значение вторичного тока, которое вводится в программу работы реле,

$$I_{\text{с.о.Сириус}} = \frac{k_{\text{сх}} I_{\text{с.о.2}}}{k_{\text{тт}}} = \frac{1 \cdot 165}{150/5} = 5,5 \text{ А}.$$

3.5 Расчёт тока срабатывания защиты от симметричных перегрузок

Защита от значительных симметричных перегрузок является наиболее важной, т.к. при работе двигателя возможны частые перегрузки по самым разным причинам. Защита от таких перегрузок обеспечивается при помощи третьей ступени, имеющей нормально-инверсную характеристику, описываемую уравнением:

$$t_{\text{с.з.Сириус}} = \frac{0,14 T_{\text{уст}}}{(I_*^{0,02} - 1)},$$

где $I_* = \frac{I}{I_{\text{уст}}}$ – кратность тока в защите (тока перегрузки), $T_{\text{уст}}$ – временной коэффициент, с, подлежащий вычислению.

Чтобы вычислить $T_{\text{уст}}$ следует помнить, что согласно ГОСТ Р 52776-2007, все двигатели мощностью выше 0,55 кВт должны выдерживать в течение двух минут ток $1,5I_{\text{ном АД}}$. Следовательно, для определения $T_{\text{уст}}$ используем выражение

$$T_{\text{уст}} = \frac{t_{\text{с.з.Сириус}} (I_*^{0,02} - 1)}{0,14}, \quad (3.1)$$

в которое подставляем следующие значения $I_* = \frac{1,5I_{\text{ном АД}}}{I_{\text{с.з.3}}} = \frac{1,5 \cdot 21,36}{24,8} = 1,29$, и требуемое значение времени срабатывания защиты $t_{\text{с.з.Сириус}} = 100 \text{ с}$. Т.е. мы

отключим наш двигатель при перегрузке 1,5 несколько раньше 2 мин, чем позволяет ГОСТ Р 52776-2007. Получаем:

$$T_{уст} = \frac{100(1,29^{0,02} - 1)}{0,14} = 3,65 \text{ с.}$$

Первичный ток срабатывания от значительных перегрузок находим по формуле:

$$I_{с.з.3} = \frac{1,08}{k_B} I_{ном АД} = \frac{1,08}{0,93} 21,36 = 24,8 \text{ А.}$$

$k_B = 0,93$ – коэффициент возврата реле «Сириус-21-Л».

Значение вторичного тока, которое вводится в программу работы реле,

$$I_{с.р.Сириус} = \frac{k_{сх} I_{с.з.3}}{k_{тт}} = \frac{1 \cdot 24,8}{150/5} = 0,83 \text{ А.}$$

3.6 Расчёт тока срабатывания защиты от небольших перегрузок

Для защиты от небольших перегрузок служит четвёртая ступень, имеющая независимую характеристику. Защита действует с выдержкой времени, превышающей время пуска двигателя, на сигнал.

Первичный ток срабатывания четвёртой ступени защиты:

$$I_{с.з.4} = \frac{1,05}{k_B} I_{ном АД} = \frac{1,05}{0,93} 21,36 = 24,11 \text{ А.}$$

Значение вторичного тока, которое вводится в программу работы реле,

$$I_{с.р.Сириус} = \frac{k_{сх} I_{с.з.4}}{k_{тт}} = \frac{1 \cdot 24,11}{150/5} = 0,8 \text{ А.}$$

Время срабатывания защиты:

$$t_{с.з.} = 1,2 t_{пуск} = 1,2 \cdot 15 = 18 \text{ с.}$$

3.7 Расчёт уставок защиты асинхронного двигателя от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ)

Для защиты от ОЗЗ используем ток нулевой последовательности основной частоты. Ток срабатывания защиты находим по выражению:

$$I_{з10} \geq \frac{k_{отс}}{k_B} k_{бр} (I_{емк.АД} + I_{емк.КЛ2}) = \frac{1,2}{0,93} 2(0,011 + 0,065) = 0,196 \text{ А}$$

где $I_{емк.АД} \approx 0,03 S_{АД} = 0,03 \frac{P_{ном(МВА)}}{\cos \varphi} = 0,03 \frac{0,315}{0,87} = 0,011 \text{ А,}$

$$I_{емк.КЛ2} = I_{уд КЛ2} l = 0,65 \cdot 0,1 = 0,065 \text{ А,}$$

$I_{уд КЛ2} = 0,65 \text{ А/км}$ – находится из справочных данных, l (км) – длина кабельной линии КЛ2.

В реле вводится величина тока срабатывания защиты от ОЗЗ равная

$$I_{310 \text{ с.р.}} = \frac{I_{310}}{k_{\text{ТТП}}} = \frac{0,196}{30} = 0,0065\text{А,}$$

здесь $k_{\text{ТТП}} = 30$ – коэффициент трансформации трансформатора тока нулевой последовательности.

Выдержка времени защиты от ОЗЗ задаётся равной 0,1 с.

Чувствительность защиты от ОЗЗ проверяется во время наладки.

3.8 Построение защитной характеристики реле «Сириус-21-Л» и схемы его подключения

Используя выше проведённые расчёты и формулу (1.1), строим защитную характеристику, согласно которой будет работать защита двигателя. Формула (1.1) используется для построения нормально-инверсной защитной характеристики третьей ступени. Для её построения выражаем время срабатывания защиты $t_{\text{с.з.Сириус}}$:

$$t_{\text{с.з.Сириус}} = \frac{0,14 T_{\text{уст}}}{(I_*^{0,02} - 1)}. \quad (3.2)$$

Далее, задаваясь кратностью тока в реле I_* , рассчитываем время срабатывания защиты $t_{\text{с.з.Сириус}}$ по формуле (3.2). По полученным данным строим характеристику третьей ступени защиты (рисунок 3.3).

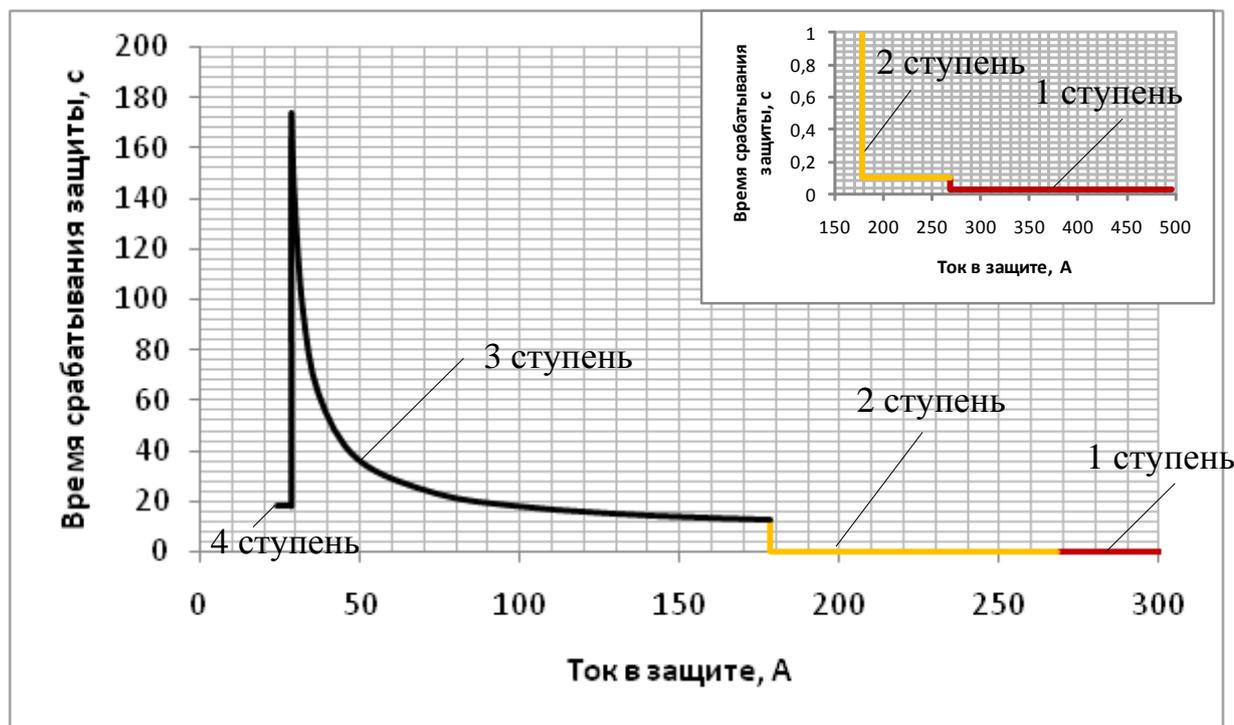


Рисунок 3.3 - Полученная защитная характеристика реле «Сириус-21-Л»

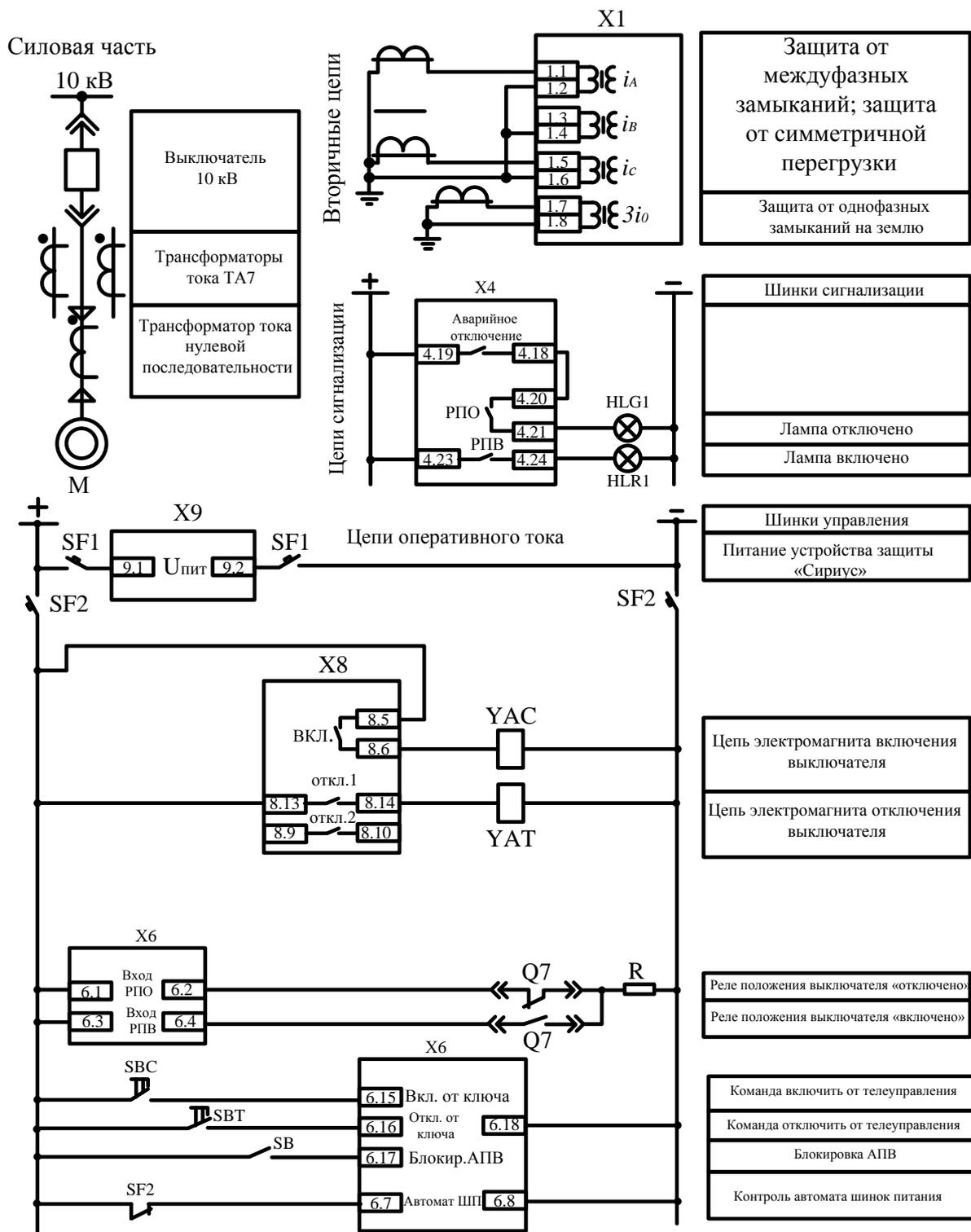


Рисунок 3.4 - Схема подключения цифрового реле «Сирius-21-Л»

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Богданов, А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.В. Богданов, А.В. Бондарев. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. — 82 с. — 8-987-903550-43-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69913.html>
2. Соловьев, А.Л. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.Л. Соловьев, М.А. Шабад. — Электрон. текстовые данные. — СПб.: Политехника, 2016. — 176 с. — 978-5-7325-1100-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/59516.html>

Дополнительная литература:

1. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст]: учеб. пособие.- 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1991.- 496 с.
2. Гельфанд, Я.С. Релейная защита распределительных сетей [Текст]: учеб. пособие.- 2-е изд, перераб. и доп./ Я.С. Гельфанд- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 368 с.
3. Гуревич, В.И. Микропроцессорные реле защиты [Электронный ресурс]: устройство, проблемы, перспективы/ В.И. Гуревич. — Электрон. текстовые данные. — М.: Инфра-Инженерия, 2013. — 336 с. — 978-5-9729-0043-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13541.html>
4. Гуревич, В.И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применения [Электронный ресурс]: настольная книга электротехника/ В.И. Гуревич. — Электрон. текстовые данные. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 688 с. — 978-5-91359-086-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20929.html>
5. Дрозд, В.В. Релейная защита и автоматика в электрических сетях [Электронный ресурс]/. — Электрон. текстовые данные. — М.: Издательский дом ЭНЕРГИЯ, Альвис, 2012. — 632 с. — 978-5-904098-21-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22702.html>
6. Щеглов, А.И. Построение схем релейной защиты [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.И. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 90 с. — 978-5-7782-1938-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45137.html>