

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович

Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Дата подписания: 09.06.2026 15:46:53

Уникальный программный ключ:

528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

**«Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»**

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Методические указания по выполнению
курсовой работы**

**Направление подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

**Направленность (профиль)
Электроснабжение**

Саратов 2026

Рецензент:

Левин Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация»
ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Кифарак Сергей Александрович, начальник СИЗПИ (Служба изоляции,
защиты перенапряжений и испытаний) Центрального производственного
отделения филиала ПАО «Россети Волга»

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: методическое указание к выполнению курсовой работы для обучающихся профиля подготовки «Электроснабжение» направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / С.В. Бахтеев // ФГБОУ ВО Вавиловский университет. – Саратов, 2026.

В методических указаниях даны основные теоретические положения содержания выполнения курсовой работы, приведены исходные данные и порядок выполнения разделов курсовой работы по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Предназначены для формирования профессиональных компетенций в процессе аудиторной и внеаудиторной самостоятельной работы при изучении отдельных глав, тем и вопросов лекционного курса, выполнения курсовой работы.

© Бахтеев С.В., 2026

© ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2026

Содержание

Введение	4
1 Расчет защит линии электропередачи напряжением 6-10 кВ	6
1.1 Объем защиты линии напряжением 6–10 кВ	6
1.2 Расчет уставок защит линии напряжением 6–10 кВ	6
1.3 Типовая схема защиты линии напряжением 6–10 кВ	13
2 Расчет защит силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ. 16	16
2.1 Объем защиты силового трансформатора	16
2.2 Исполнение и расчет защит силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ	16
2.3 Типовая схема защиты силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ	23
3 Расчет защит электродвигателя напряжением выше 1 кВ	25
3.1 Объем защиты электродвигателя напряжением выше 1 кВ	25
3.2 Исполнение и расчет защит электродвигателей	25
3.3 Типовые схемы защит электродвигателей	30
Список литературы	38
Приложение А – Задание на курсовое проектирование	40
А.1 Форма задания на курсовое проектирование	40
А.2 Варианты задания	41
Приложение Б – Расчет токов короткого замыкания.....	47
Б.1 Методика расчета токов коротких замыканий	47
Б.2 Определение параметров элементов схемы замещения	47
Б.3 Преобразование схемы замещения к точкам коротких замыканий.....	48
Б.4 Расчет токов короткого замыкания.....	48
Приложение В – Расчет режима самозапуска	51
В.1 Принимаемые допущения	51
В.2 Порядок расчета	51

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа (КР) по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» помогает формированию у обучающихся необходимых компетенций в области проектирования, разработки, наладки и эксплуатации релейной защиты, решая следующие задачи:

- усвоение принципов организации и технической реализации релейной защиты и автоматизации (РЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем электроснабжения (СЭС) агропромышленных комплексов (АПК);

- формирование принципов выполнения защит, как отдельных элементов, так и системы в целом;

- освоение положений по расчету систем релейной защиты и автоматизации, выполненных на различной элементной базе.

В результате выполнения КР и освоения дисциплины обучающийся готовится к следующим видам деятельности в соответствии с образовательным стандартом ФГОС ВО 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (уровень бакалавриата):

проектно-конструкторская деятельность:

- сбор и анализ данных для проектирования;

- участие в расчетах и проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования;

- контроль соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам;

- проведение обоснования проектных расчетов;

производственно-технологическая деятельность:

- расчет схем и параметров элементов оборудования;

- расчет режимов работы объектов профессиональной деятельности;

- контроль режимов работы технологического оборудования;

- обеспечение безопасного производства;

- составление и оформление типовой технической документации.

КР помогает в изучении дисциплины, формируя профессиональные компетенции, заключающиеся способности принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования.

Организация курсового проектирования. Курсовая работа является одной из форм отчета обучающихся за определенный этап обучения и призвана закрепить общепрофессиональные и профессиональные компетенции на основе полученных знаний и самостоятельного решения

конкретных практических задач. Курсовым проектированием на разных уровнях руководят деканат факультета, кафедра и ведущий преподаватель. Кафедра, проводящая курсовое проектирование, разрабатывает и издает методические указания, в которых излагаются конкретные задачи учебного проектирования, характер исходных данных, объем и содержание отдельных частей работы, порядок ее выполнения. Руководитель КР организует и обеспечивает процесс проектирования, полноту решения поставленных перед студентом задач, ритмичность работы и своевременность завершения этапов, соответствие предлагаемых решений уровню развития и современному состоянию отраслевой науки и техники.

КР выполняется обучающимися в соответствии с графиком проектирования. Трудоемкость каждого этапа оценивается в процентах от общего объема работ. Ход курсового проектирования отражается на графиках текущей успеваемости, доступных для ознакомления деканату, преподавателям кафедры и обучающимся.

Заведующий выпускающей кафедры периодически проверяют ход работы, контролируют направленность и методику работы руководителей, заслушивая и обсуждая их отчеты на заседаниях кафедры.

Типовое задание для выполнения курсовой работы по теме «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем АПК» приведено в приложении А.

Оценка курсовой работы во многом зависит как от качества выполненного задания, так и от умения обучающегося раскрыть и показать уровень своих теоретических и практических знаний при защите выполненной работы.

Перед выполнением КР обучающемуся следует изучить основные теоретические сведения, излагаемые в методических указаниях.

1 РАСЧЕТ ЗАЩИТ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 КВ

1.1 Объем защиты линии напряжением 6–10 кВ

1.1.1 Для линий в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от многофазных замыканий и от однофазных замыканий на землю.

1.1.2 Защиту от многофазных замыканий следует предусматривать в двухфазном исполнении и включать в одни и те же фазы по всей сети данного напряжения для обеспечения отключения в большинстве случаев двойных замыканий на землю только одного места повреждения.

Защита должна быть выполнена одно-, двух- или трехрелейной в зависимости от требований чувствительности и надежности.

На одиночных линиях с односторонним питанием от многофазных замыканий должна устанавливаться, как правило, двухступенчатая токовая защита, первая ступень которой выполнена в виде токовой отсечки, а вторая – в виде максимальной токовой защиты (МТЗ) с независимой или зависимой характеристикой выдержки времени.

1.1.3 Защита от однофазных замыканий на землю должна быть выполнена в виде:

- селективной защиты (устанавливающей поврежденное направление), действующей на сигнал;
- селективной защиты, действующей на отключение, когда это необходимо по требованиям безопасности; защита должна быть установлена на питающих элементах во всей электрически связанной сети;
- устройства контроля изоляции, при этом допускается отыскание поврежденного элемента поочередным отключением присоединений.

1.2 Расчет уставок защит линии напряжением 6–10 кВ

1.2.1 Ток срабатывания селективной токовой отсечки линии $I_{CO,л}$, А, определяется по выражению

$$I_{CO,л} \geq k_{отс} \cdot I_{к,маx}^{(3)}, \quad (1.1)$$

где $k_{отс}$ – 1,3–1,4 (для реле тока типа РСТ-40);

$I_{к,маx}^{(3)}$ – действующее значение периодической составляющей тока металлического трехфазного короткого замыкания (КЗ) в конце защищаемой линии в максимальном режиме питающей сети, А.

Кроме условия (1.1) должна быть обеспечена отстройка токовой отсечки от бросков тока намагничивания силовых трансформаторов, получающих питание по защищаемой линии. Для отсечек с микропроцес-

сорного реле тока типа РСТ-40 (аналога электромеханического реле РТ-40) и промежуточными реле должно выполняться условие

$$\left. \begin{aligned} I_{CO,Л} &\approx (3\div 4)\Sigma I_{НОМ,Т}; \\ \Sigma I_{НОМ,Т} &= \Sigma S_{НОМ,Т}/(\sqrt{3} U_{НОМ,С}), \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где $\Sigma I_{НОМ,Т}$ – сумма номинальных токов силовых трансформаторов, получающих питание по защищаемой линии, А;

$\Sigma S_{НОМ,Т}$ – сумма номинальных мощностей силовых трансформаторов, получающих питание по защищаемой линии, А;

$U_{НОМ,С}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

Окончательно выбирается большее из значений, вычисленных по выражениям (1.1), (1.2).

Ток срабатывания реле селективной токовой отсечки линии $I_{СР,ТО,Л}$, А, определяется по выражению

$$I_{СР,ТО,Л} = k_{СХ}^{(3)} \cdot I_{CO,Л}/K_I, \quad (1.3)$$

где $k_{СХ}^{(3)}$ – коэффициент схемы при симметричном режиме;

K_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока.

$$K_I = I_{1,НОМ,ТТ}/I_{2,НОМ,ТТ}, \quad (1.4)$$

где $I_{1,НОМ,ТТ}$; $I_{2,НОМ,ТТ}$ – номинальный первичный и вторичный ток трансформатора тока, А, соответственно.

Технические данные трансформаторов тока приведены в приложении Б (см. таблицу Б.1).

Выбор трансформаторов тока производится по условию

$$\left. \begin{aligned} U_{НОМ,ТТ} &\geq U_{НОМ,С}; \\ I_{1,НОМ,ТТ} &\geq I_{РАБ,МАХ}, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

где $U_{НОМ,ТТ}$ – номинальное напряжение трансформатора тока, кВ.

Проверка по стойкости трансформатора тока к токам КЗ в данном курсовом проекте не выполняется.

Чувствительность селективной токовой отсечки линии напряжением 6–10 кВ оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{Ч,ТО,Л}$ по условию

$$k_{Ч,ТО,Л} = \frac{I_{К,МАХ}^{(2)}}{I_{CO,Л}} \geq 1,2, \quad (1.6)$$

где $I_{К,МАХ}^{(2)}$ – действующее значение периодической составляющей тока металлического двухфазного КЗ в месте установки отсечки в максимальном (т.е. наиболее благоприятном по условию

чувствительности) режиме питающей сети, А /1/.

1.2.2 Расчет тока срабатывания МТЗ одиночной линии без резервирования на приемном конце $I_{СЗ,МТЗ,Л}$, А, выполняется по выражению

$$I_{СЗ,МТЗ,Л} \geq \frac{k_{ОТС} k_{СЗП}}{k_B} I_{раб,маx}, \quad (1.7)$$

где $k_{ОТС} = 1,1 \div 1,2$;

$k_{СЗП}$ – коэффициент самозапуска; расчет $k_{СЗП}$ см. приложение В;

$I_{раб,маx}$ – максимальный рабочий ток защищаемого присоединения в доаварийном режиме, А;

k_B – коэффициент возврата; для реле тока серии РСТ-40 $k_B = 0,85$.

Значение тока срабатывания $I_{СЗ,ПОСЛ}$, А, последующей (расположенной ближе к источнику питания) защиты должно быть согласовано с большим значением из токов срабатывания $I_{СЗ,ПРЕД}$, А, защит предыдущих элементов по выражению

$$I_{СЗ,ПОСЛ} \geq k_{НС}(I_{СЗ,ПРЕД} + I_{РАБ,МАХ} - I_{РАБ,МАХ,ПРЕД}), \quad (1.8)$$

где $k_{НС}$ – коэффициент надежности согласования; для реле тока типа РСТ-40 $k_{НС} = 1,25$;

$I_{РАБ,МАХ,ПРЕД}$ – максимальный рабочий ток предыдущего элемента с большим значением тока срабатывания МТЗ, А.

Ток срабатывания реле МТЗ линии $I_{СР,МТЗ,Л}$, А, определяется по формуле

$$I_{СР,МТЗ,Л} = k_{СХ}^{(3)} \cdot I_{СЗ,МТЗ,Л} / K_I. \quad (1.9)$$

Параметры реле тока серии РСТ-40 приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические данные реле тока серии РСТ-40

Тип реле	Диапазон уставок, А	Ток срабатывания при соединении катушек, А		Потребляемая мощность при токе минимальной уставки, В·А
		последовательном	параллельном	
РСТ-40/2	0,5–2	0,5–1	1–2	0,2
РСТ-40/6	1,5–6	1,5–3	3–6	0,5
РСТ-40/10	2,5–10	2,5–5	5–10	0,5
РСТ-40/20	5–20	5–10	10–20	0,5
РСТ-40/50	12,5–50	12,5–25	25–50	0,8
РСТ-40/100	25–100	25–50	50–100	1,8

Чувствительность МТЗ линии оценивается с помощью коэффициента чувствительности $K_{ч,МТЗ,Л}$ по выражению

$$k_{ч,МТЗ,Л} = \frac{I_{к,мин}^{(2)}}{I_{сз,МТЗ,Л}}. \quad (1.10)$$

Выдержка времени МТЗ последующей защиты $t_{МТЗ,ПОСЛ}$, с, определяется по выражению

$$t_{МТЗ,ПОСЛ} = t_{МТЗ,ПРЕД} + \Delta t, \quad (1.11)$$

где $t_{МТЗ,ПРЕД}$ – наибольшая из выдержек времени предыдущих защит, с;
 $\Delta t = 0,5$ с.

В соответствии с принятым значением $t_{МТЗ,ПОСЛ}$ производится проверка линии на термическую стойкость по выражению

$$F_{min} \leq F, \quad (1.12)$$

где F_{min} – минимально допустимое сечение жилы кабеля по условию обеспечения термической стойкости, $мм^2$;

F – реальное сечение жилы кабеля, $мм^2$.

$$F_{min} = \frac{I_K^{(3)}}{C} \sqrt{t_{ОТК}}, \quad (1.13)$$

где $I_K^{(3)}$ – периодическая составляющая тока трехфазного КЗ в начале защищаемой линии, А;

$t_{ОТК}$ – время от начала КЗ до его отключения, с;

$C = 91 \text{ А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$ – постоянная величина.

$$t_{ОТК} = t_{сз,1} + t_{сз,2} + 2t_{ОВ}, \quad (1.14)$$

где $t_{сз,1}$ – основное время срабатывания МТЗ, с;

$t_{сз,2}$ – время срабатывания МТЗ с ускорением действия защиты (УДЗ) после АПВ, с; если УДЗ отсутствует, $t_{сз,2} = t_{сз,1}$;

$t_{ОВ}$ – время отключения выключателя, с; для ВКЭ–10 $t_{ОВ} = 0,07$ с.

1.2.3 Для защиты от однофазных замыканий на землю кабельных линий (КЛ) используются устройства защиты, действующие на сигнал. Отключение поврежденного участка применяется в тех случаях, когда оно необходимо по условиям техники безопасности, или когда отключение линии не вызывает перерыва в питании потребителя, имеющего двухстороннее питание или резервирование.

Защита, действующая на отключение, должна выполняться двухступенчатой, первая ступень которой выполняется в виде защиты типа ЗЗП–1 без выдержки времени, а вторая ступень – в виде защиты макси-

мального напряжения нулевой последовательности, выполненной с помощью реле максимального напряжения типа РН-53/60Д, включенного на разомкнутый треугольник дополнительной вторичной обмотки шинного трансформатора напряжения, и реле времени. Первая ступень защиты отключает поврежденное присоединение, а вторая ступень – секцию шин. Уставка напряжения срабатывания второй ступени защиты $U_{СЗ, В}$, определяется по /16/:

$$U_{СЗ} = k_3 \cdot U_{НБ}, \quad (1.15)$$

где k_3 – коэффициент запаса; $k_3 = 1,5 \div 2$;

$U_{НБ}$ – напряжение небаланса, В.

В сетях с компенсированной нейтралью $U_{НБ}$ может достигать 15–20 % фазного напряжения.; в сетях с изолированной нейтралью небаланс мал и уставка защиты выбирается минимально возможной по реле. Выдержка реле времени защиты принимается около 0,5 с.

Для сетей, в которых не требуется установка двухступенчатых защит с действием на отключение, обязательно применение устройства контроля изоляции, которое обычно выполняется с использованием реле напряжения, включенного на разомкнутый треугольник дополнительной вторичной обмотки шинного трансформатора напряжения и вольтметра с переключателем.

Для защиты КЛ от замыкания на землю используются специальные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП), монтируемые вблизи кабельной воронки на головном участке, первичной обмоткой которых является трехфазный кабель. Конструктивное выполнение узла с ТТНП подробно рассмотрено в /15–18/.

В сетях с компенсированной нейтралью рекомендуется применять устройства типа УСЗ-2/2 и УСЗ-3М. Устройство типа УСЗ-3М рекомендуется устанавливать по одному на секцию сборных шин /6/.

В сетях с изолированной нейтралью целесообразно применять защиту с реле типа РТЗ-51, если обеспечивается необходимая чувствительность защиты, в сочетании с устройством УСЗ-3М. Селективность защиты с реле типа РТЗ-51 может быть обеспечена при большом числе присоединений, когда суммарный емкостный ток (10–20 А) примерно в 10 раз превышает максимальный емкостный ток одного элемента. Если из-за недостаточной чувствительности реле типа РТЗ-51 требуется обеспечить минимальный ток срабатывания защиты, следует предусматривать направленную токовую защиту нулевой последовательности типа ЗЗП-1, которая особенно эффективна при малых токах замыкания на землю (не менее $0,5 \div 1$ А).

Уставки реле тока защиты от замыкания на землю с реле типа РТЗ-51 рассчитываются, как правило, в первичных токах. Первичный ток срабатывания защиты I_{C3} , А, определяется по выражению

$$I_{C3} \geq k_{OTC} \cdot k_{\delta} \cdot I_C, \quad (1.16)$$

где $k_{OTC} = 1,2 \div 1,3$;

k_{δ} – коэффициент, учитывающий бросок собственного емкостного тока защищаемого присоединения; для реле типа РТЗ-51

$$k_{\delta} = 2 \div 2,5;$$

I_C – емкостный ток защищаемого присоединения, А.

Емкостный ток кабельной линии $I_C = I_{C,Л}$, А, вычисляется по выражению

$$I_{C,Л} = I_{C,КЛ,0} \cdot l \cdot m, \quad (1.17)$$

где $I_{C,Л}$ – емкостный ток линии, А;

$I_{C,КЛ,0}$ – удельный емкостный ток КЛ, А/км (см. таблицу 1.2);

l – длина линии, км;

m – число параллельных кабелей в линии;

Таблица 1.2 – Средние значения удельного емкостного тока металлического однофазного замыкания на землю для КЛ /6/

Сечение жилы кабеля, мм ²	Ток, А/км, при номинальном напряжении кабеля, кВ	
	6	10
16	0,31	0,43
25	0,43	0,56
35	0,49	0,63
50	0,58	0,73
70	0,73	0,87
95	0,89	1,02
120	1,00	1,16
150	1,19	1,30
185	1,28	1,51
240	1,33	1,80

Если значение I_{C3} , вычисленное по (1.16), меньше минимального тока срабатывания защиты $I_{C3,min}$, указанного в таблице 1.3, то ток срабатывания принимается по условию: $I_{C3} = I_{C3,min}$.

Таблица 1.3 – Токи срабатывания защиты от замыкания на землю с реле типа РТЗ-51 /10/

Тип ТТНП	Количество ТТНП и их соединение						
	1	2	3	4	2	3	4
	последовательно			параллельно			
ТЗЛ	$\frac{0,68}{3,96}$	$\frac{1,25}{6,80}$	$\frac{1,95}{9,83}$	$\frac{2,48}{14,6}$	$\frac{0,97}{4,25}$	$\frac{1,19}{4,80}$	$\frac{1,43}{5,95}$
	$\frac{0,60}{3,26}$	$\frac{1,08}{6,35}$	$\frac{1,60}{9,60}$	$\frac{2,16}{13,00}$	$\frac{0,89}{4,62}$	$\frac{1,08}{5,10}$	$\frac{1,33}{5,66}$

Примечание – В числителе приведены минимальные, а в знаменателе – максимальные токи срабатывания.

Чувствительность защиты от однофазных замыканий на землю оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I'_{\text{C},\Sigma} - I_{\text{C}}}{I_{\text{CЗ}}}, \quad (1.18)$$

где $I'_{\text{C},\Sigma}$ – наименьшее значение суммарного емкостного тока замыкания на землю, А.

Суммарный емкостный ток замыкания на землю в электрически связанной сети 6–10 кВ определяется как сумма емкостных токов отдельных присоединений. Для кабельной линии к трансформатору, распределительному пункту (РП) или электродвигателю (ЭД) емкостный ток определяется по выражению (1.17). С учетом емкостного тока линии емкостной ток электродвигателя I_{C} , А, определяется по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{C}} &= I_{\text{C,л}} + I_{\text{C,д}}; \\ I_{\text{C,д}} &= \frac{6\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{Д}} U_{\text{НОМ,ЭД}} \cdot 10^3}{\sqrt{3}}; \\ C_{\text{Д}} &\approx \frac{0,0187 \cdot S_{\text{НОМ,ЭД}} \cdot 10^{-6}}{1,2 \sqrt{U_{\text{НОМ,ЭД}} (1 + 0,08 U_{\text{НОМ,ЭД}})}} \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

где $I_{\text{C,л}}$ – емкостный ток линии к ЭД, А;

$I_{\text{C,д}}$ – емкостный ток ЭД, А;

$f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота сети, Гц;

$C_{\text{Д}}$ – емкость фазы статора ЭД, Ф;

$U_{\text{НОМ,ЭД}}$ – номинальное напряжение ЭД, кВ;

$S_{\text{НОМ,ЭД}}$ – номинальная полная мощность ЭД, МВ•А.

Согласно /1/ для кабельной линии должно выполняться условие $k_{\text{ч}} \geq 1,25$. Кроме того, должны обеспечиваться следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} 4A &\geq I_{\text{C},3} \geq 3 I_{\text{C}}; \\ I_{\text{C},\Sigma} &\geq (4 \div 5) I_{\text{C}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

Расчетный ток срабатывания защиты типа ЗЗП-1 $I_{\text{C},\text{РАСЧ}}$, А, определяется с учетом требования обеспечить $k_{\text{ч}} = 2$ по формуле

$$I_{\text{C},\text{РАСЧ}} \leq \frac{I'_{\text{C},\Sigma} - I_{\text{C}}}{k_{\text{ч}}} = \frac{I'_{\text{C},\Sigma} - I_{\text{C}}}{2}. \quad (1.21)$$

Принятый ток срабатывания $I_{\text{C},3}$, А, принимается равным ближайшему меньшему по отношению к $I_{\text{C},\text{РАСЧ}}$ значению: 0,07; 0,5; 2 А.

Чувствительность защиты проверяется при принятом значении $I_{\text{C},3}$ с учетом 30 % разброса, имеющего место в защите, по условию

$$k_{\text{ч}} = \frac{I'_{\text{C},\Sigma} - I_{\text{C}}}{1,3I_{\text{C},3}} \geq 2. \quad (1.22)$$

В сетях, где $k_{\text{ч}} \gg 2$, рекомендуется загрублять защиту переходом на более грубые уставки при соблюдении условия (1.22).

Цепи защиты с реле типа РТЗ-51 показаны на рисунке 3.1, 3.2 (реле КА3), ЗЗП-1 – на рисунке 1.1 (устройство АК).

Методика расчета уставок защиты с устройством типа УСЗ-2/2 приведена в /6, 8/. Расчет уставок устройства типа УСЗ-3М производить не требуется.

1.3 Типовая схема защиты линии напряжением 6–10 кВ

Схема защиты КЛ напряжением 6–10 кВ дана на рисунке 1.1.

Токовая отсечка выполнена по схеме неполной звезды и содержит реле тока КА1, КА2 и указательное реле КН1.

МТЗ выполнена по схеме неполной звезды и содержит реле тока КА3–КА5, реле времени КТ и указательное реле КН3. УДЗ выполнено по цепи: контакты КQT, КТ.2, КТ.3, где КQT – контакт реле положения выключателя Q "Отключено" (обмотка реле КQT в схеме не показана). УДЗ после АПВ позволяет ускорить отключение КЗ путем автоматического кратковременного уменьшения выдержки времени МТЗ до 0,5 с. Выдержка времени предусмотрена для отстройки токового органа защиты от тока самозапуска, повышенного за счет еще не затухшей ЭДС ЭД на их выбеге. Уставка импульсного контакта КТ.3 реле времени КТ равна 0,5 с, реле КQT должно иметь задержку на возврат не менее 0,5 с.

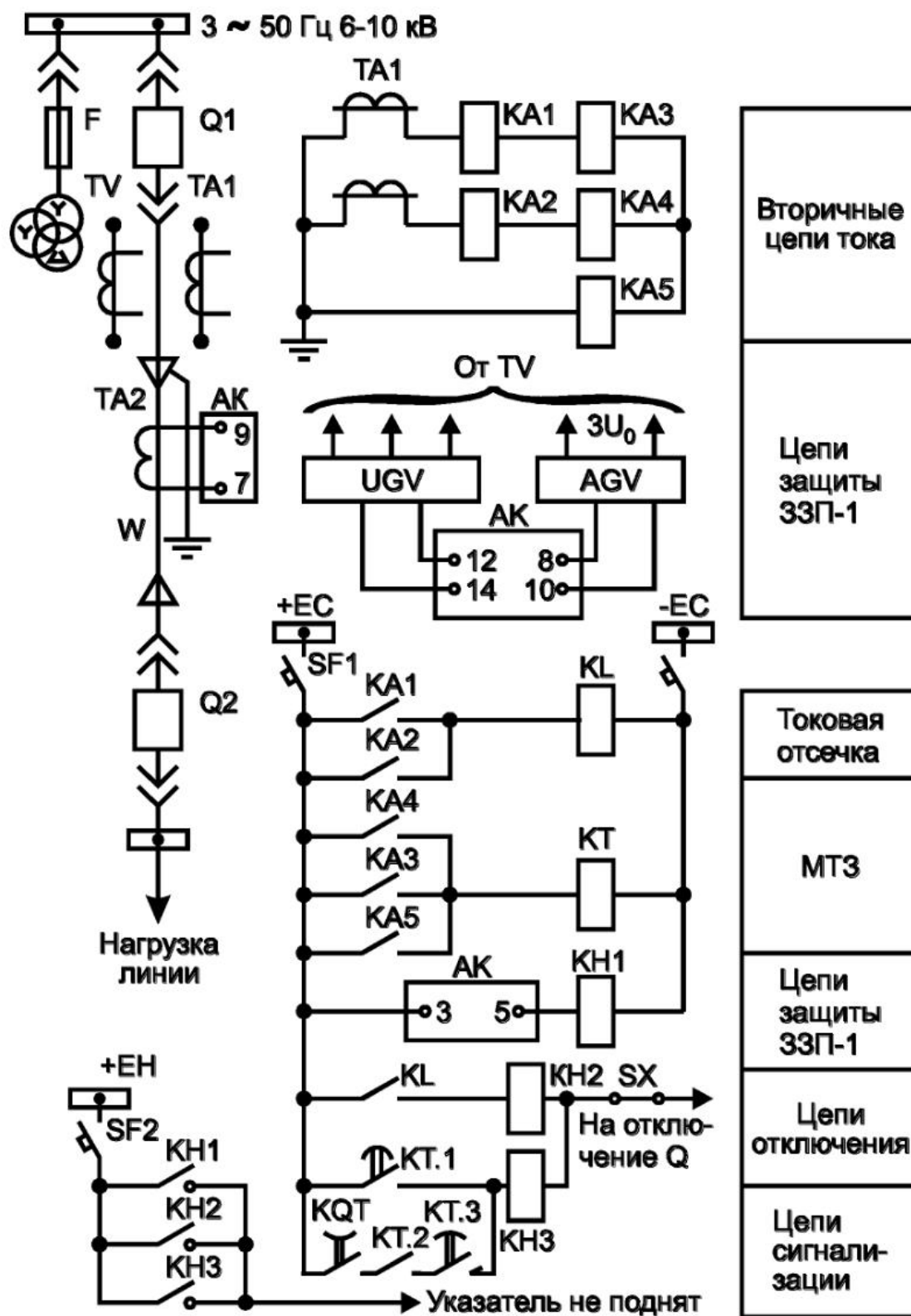


Рисунок 1.1 – Схема защиты линии напряжением 6–10 кВ

Защита от однофазных замыканий на землю выполнена с помощью направленной защиты типа 3ЗП-1, подключенной к зажимам вторичной обмотки ТНП ТА2.

В схеме использовано следующее оборудование: Q – выключатель типа ВКЭ-10; ТА1 – трансформаторы тока типа ТЛМ-10; ТА2 – ТТНП типа ТЗЛМ; SF1, 2 – автоматические выключатели; КА1-КА5 – реле тока типа РСТ-40; КТ – реле времени типа РВ-122; АК – направленная защита типа ЗЗП-1; UGV – блок питания типа БПН-11; AGV – вспомогательное устройство типа ВУ-1; КН1÷ КН3 – реле указательные типа РУ-1; КL – реле промежуточные типа РП-23; КQT – реле промежуточное типа РП-252; SX – накладка (оперативная контактная перемычка) типа НКР-3.

2 РАСЧЕТ ЗАЩИТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10/0,4 кВ

2.1 Объем защиты силового трансформатора

2.1.1 Для трансформаторов должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от следующих видов повреждений и ненормальных режимов работы:

- многофазных замыканий в обмотках и на выводах;
- токов в обмотках; обусловленных внешними КЗ;
- однофазных замыканий на землю в обмотке и на выводах, присоединенных к сети с глухозаземленной нейтралью;
- токов в обмотках, обусловленных перегрузкой;
- витковых замыканий в обмотках;
- понижением уровня масла;
- однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью, если трансформатор питает сеть, в которой отключение однофазных замыканий на землю необходимо по требованиям безопасности.

2.2 Исполнение и расчет защит силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ

2.2.1 Для защиты от повреждений на выводах силового трансформатора напряжением 6-10/0,4 кВ мощностью до 2500 кВ•А, а также от внутренних повреждений должны быть предусмотрены:

- а) токовая отсечка без выдержки времени, устанавливаемая со стороны питания и охватывающая часть обмотки трансформатора;
- б) продольная дифференциальная защита без выдержки времени на трансформаторах мощностью не менее 1 МВ•А, если:
 - токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, а МТЗ имеет выдержку времени более 0,5 с;
 - трансформатор установлен в районе, подверженном землетрясениям.

Указанные защиты должны действовать на отключение всех выключателей трансформатора. В случае схемы линия–трансформатор защиты действуют только на выключатель линии.

Ток срабатывания отсечки силового трансформатора $I_{CO,T}$, А, определяется по выражению

$$I_{CO,T} \geq k_{OTC} \cdot I_{K,max}^{(3)}, \quad (2.1)$$

где k_{OTC} – 1,3÷1,4 (для реле тока типа РСТ-40);

$I_{к, \max}^{(3)}$ – действующее значение периодической составляющей тока металлического трехфазного КЗ за трансформатором в максимальном режиме питающей сети, приведенное к напряжению обмотки высшего напряжения (ВН), А.

Ток срабатывания реле токовой отсечки силового трансформатора $I_{ср, то, т}$, А, определяется по выражению

$$I_{ср, то, т} = k_{сх}^{(3)} \cdot I_{с0, т} / K_I. \quad (2.2)$$

Выбор трансформаторов тока производится по условию (1.5), где

$I_{раб, \max} = 1,4 I_{ном, т, вн}$; $I_{ном, т, вн}$ – номинальный ток силового трансформатора на стороне ВН, А.

Чувствительность отсечки силового трансформатора оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{ч, то, т}$ по условию

$$k_{ч, то, т} = \frac{I_{к, \min}^{(2)}}{I_{с0, т}} \geq 2,0, \quad (2.3)$$

где $I_{к, \min}^{(2)}$ – действующее значение периодической составляющей тока при двухфазном КЗ в месте установки отсечки в минимальном режиме питающей сети по уровню токов КЗ, А.

Для блока линия–трансформатор чувствительность отсечки проверяется при двухфазном КЗ в конце линии.

2.2.2 Защита силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ от токов, обусловленных внешними КЗ, выполняется с помощью максимальной токовой защиты, установленной на стороне ВН.

Для отстройки от тока перегрузки после действия устройства автоматического включения резерва (АВР) на двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами Т1, Т2 первичный ток срабатывания МТЗ каждого из двух трансформаторов, находящихся в неявном резерве, выбирается по выражению (записанному для защиты трансформатора Т1):

$$I_{сз, МТЗ, Т1} \geq \frac{k_{отс}}{k_B} \left(k_{сзп} I_{раб, \max, Т1} + k'_{отс} I_{раб, \max, Т2} \right), \quad (2.4)$$

где $k_{отс} = 1,1 \div 1,2$;

$k'_{отс}$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока через трансформатор Т2 из-за понижения напряжения на шинах низшего напряжения (НН) при подключении к нему после АВР заторможенных ЭД другой секции, ранее питавшейся через трансформатор Т1; $k'_{отс} \approx 1,5 \div 2$;

$k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска (расчет $k_{сзп}$ дан в приложении В);

$I_{\text{раб,мах}}$ – максимальный рабочий ток защищаемого присоединения в доаварийном режиме; $I_{\text{раб,мах}} = 0,7I_{\text{НОМ,Т,ВН}}$.

Ток срабатывания реле МТЗ $I_{\text{СР,МТЗ,Т}}$, А, определяется по формуле

$$I_{\text{СР,МТЗ,Т}} = k_{\text{СХ}}^{(3)} \cdot I_{\text{СЗ,МТЗ,Т}} / K_{\text{I}}. \quad (2.5)$$

Таблица 2.1 – Формулы для определения расчетных токов в реле МТЗ при двухфазных КЗ

Схема МТЗ	$k_{\text{СХ}}^{(3)}$	Токи в реле при двухфазном КЗ	
		в месте установки защиты или за трансформатором Y/Y-0 (12)	за трансформатором Y/Δ-11
1 Неполная звезда с двумя реле	1	$I_{\text{P}} = \frac{\sqrt{3}I_{\text{K}}^{(3)}}{2K_{\text{I}}}$	$I_{\text{P}} = \frac{0,5I_{\text{K}}^{(3)}}{K_{\text{I}}}$
2 Неполная звезда с тремя реле, третье реле включено в обратный провод	1	$I_{\text{P}} = \frac{\sqrt{3}I_{\text{K}}^{(3)}}{2K_{\text{I}}}$	$I_{\text{P}} = \frac{I_{\text{K}}^{(3)}}{K_{\text{I}}}$
Схема МТЗ	$k_{\text{СХ}}^{(3)}$	Токи в реле при двухфазном КЗ	
		в месте установки защиты или за трансформатором Y/Y-0 (12)	за трансформатором Y/Δ-11
4 Треугольник с тремя реле	$\sqrt{3}$	$I_{\text{P}} = \frac{\sqrt{3}I_{\text{K}}^{(3)}}{K_{\text{I}}}$	$I_{\text{P}} = \frac{1,5I_{\text{K}}^{(3)}}{K_{\text{I}}}$
Примечания			
1 $I_{\text{K}}^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ, приведенный к напряжению той стороны, где установлена рассматриваемая защита.			
2 K_{I} – коэффициент трансформации трансформаторов тока.			

Чувствительность МТЗ силового трансформатора оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{\text{ч,МТЗ,Т}}$ по выражению

$$k_{\text{ч,МТЗ,Т}} = \frac{I_{\text{p,min}}}{I_{\text{СР,МТЗ,Т}}}, \quad (2.6)$$

где $I_{\text{p,min}}$ – расчетный ток реле МТЗ при двухфазном КЗ за трансформатором, А; формулы для определения $I_{\text{p,min}}$ приведены в

таблице 2.1.

При этом должно выполняться условие $k_{ч,МТЗ,Т} \geq 1,5$.

Выдержка времени МТЗ $t_{МТЗ}$, с, определяется по выражению

$$t_{МТЗ} = t_{НН.мах} + \Delta t, \quad (2.7)$$

где $t_{НН.мах}$ – наибольшая выдержка времени защиты на стороне НН

трансформатора; в расчетах принять $t_{НН.мах} = 0,2$ с;

$\Delta t = 0,5$ с – ступень селективности.

2.2.3 Защита от однофазных замыканий на землю в обмотке и на выводах, присоединенных к сети с глухозаземленной нейтралью, осуществляется применением:

а) максимальной токовой защиты от внешних КЗ, устанавливаемой на стороне ВН, и, если это требуется по условиям чувствительности, в трехрелейном исполнении. Чувствительность МТЗ силового трансформатора в этом случае оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{ч,МТЗ,Т}$ по выражению (2.6). Формулы для определения

$I_{р,мин}$ приведены в таблице 2.2;

б) автоматических выключателей или предохранителей на выводах низшего напряжения;

в) специальной защитой нулевой последовательности, устанавливаемой в нулевом проводе трансформатора (при недостаточной чувствительности защит по пп. "а" и "б").

Для промышленных электроустановок, если сборка на стороне НН с аппаратами защиты присоединений находится в непосредственной близости от трансформатора (до 30 м) или соединение между трансформатором и сборкой выполнено трехфазными кабелями, допускается защиту по п. "в" не применять.

Для схемы линия – трансформатор в случае применения защиты по п. "в" допускается не прокладывать специальный контрольный кабель для обеспечения действия этой защиты на выключатель со стороны ВН и выполнять ее с действием на автоматический выключатель, установленный на стороне НН.

Для специальной защиты нулевой последовательности, установленной в нулевом проводе трансформатора, ток срабатывания защиты $I_{СЗ,СПЕЦ}$, А, определяется по выражениям:

– для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/\mathbf{Y} :

$$I_{СЗ,СПЕЦ} = 0,25k_{ОТС} \cdot k_{ПЕР} \cdot I_{НОМ,Т,НН}; \quad (2.8)$$

– для трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/\mathbf{Y} :

$$I_{СЗ,СПЕЦ} = 0,75k_{ОТС} \cdot k_{ПЕР} \cdot I_{НОМ,Т,НН}, \quad (2.9)$$

где $I_{НОМ,Т,НН}$ – номинальный ток трансформатора на стороне НН, А;

$$k_{ОТС} = 1,1 \div 1,2;$$

$k_{ПЕР}$ – коэффициент, учитывающий допустимую кратковременную перегрузку трансформатора; при отсутствии расчетных данных $k_{ПЕР} = 1,3$ (для масляных трансформаторов).

Таблица 2.2 – Формулы для определения расчетных токов в реле МТЗ на стороне 6–10 кВ при однофазных КЗ на стороне 0,4 кВ

Схема МТЗ	$k_{СХ}^{(3)}$	Токи в реле при однофазном КЗ за трансформатором	
		Y/Y-0 (11)	Δ/Y -11
1 Неполная звезда с двумя реле	1	$I_P = \frac{I_K^{(1)}}{3K_I}$	$I_P = \frac{I_K^{(1)}}{\sqrt{3}K_I}$
2 Неполная звезда с тремя реле, третье реле включено в обратный провод	1	$I_P = \frac{2I_K^{(1)}}{3K_I}$	$I_P = \frac{I_K^{(1)}}{\sqrt{3}K_I}$
3 Треугольник с тремя реле	$\sqrt{3}$	Не применяется	$I_P = \frac{2I_K^{(1)}}{\sqrt{3}K_I}$

Примечание – $I_K^{(1)}$ - ток однофазного КЗ на землю, приведенный к напряжению той стороны, где установлена рассматриваемая защита.

Чувствительность специальной защиты нулевой последовательности, установленной в нулевом проводе трансформатора оценивается при помощи коэффициента чувствительности $k_{ч,СПЕЦ}$ по выражению

$$k_{ч,СПЕЦ} = \frac{I_{к,мин}^{(1)}}{I_{СЗ,СПЕЦ}}, \quad (2.10)$$

где $I_{к,мин}^{(1)}$ – минимальное значение тока однофазного КЗ на сборных шинах 0,4 кВ, приведенное к стороне 0,4 кВ.

При этом должно выполняться условие: $k_{ч,СПЕЦ} \geq 1,5$.

Для силового трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y -11 ток однофазного КЗ на стороне 0,4 кВ определяется по формуле

$$I_k^{(1)} = I_k^{(3)}. \quad (2.11)$$

Для силового трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y-0 (11) ток однофазного КЗ на стороне 0,4 кВ определяется по формуле

$$I_k^{(1)} = \frac{U_\Phi}{\frac{1}{3}Z_{TP}^{(1)}}, \quad (2.12)$$

где U_Φ – фазное напряжение, В;

$Z_{TP}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора, отнесенное к стороне 0,4 кВ при $K^{(1)}$, Ом (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Сопротивление $\frac{1}{3}Z_{TP}^{(1)}$ трансформаторов 6–10/0,4 кВ

Тип трансформатора	$\frac{1}{3}Z_{TP}^{(1)}$, Ом	Тип трансформатора	$\frac{1}{3}Z_{TP}^{(1)}$, Ом
ТМ–400	0,065	ТМ–1000	0,027
ТМ–630	0,038	–	–

Чувствительность и время срабатывания защиты согласуются с характеристиками защитных устройств элементов 0,4 кВ, не имеющих специальной защиты нулевой последовательности, таким образом, чтобы при выдержке времени защиты $0,5 \div 0,7$ с обеспечить степень селективности около 0,5 с. Если на элементах сети 0,4 кВ имеется дополнительная защита нулевой последовательности без выдержки времени, то защиты нулевой последовательности на вводах 0,4 кВ трансформатора могут иметь выдержку времени $0,3 \div 0,4$ с, а в нейтрали – на ступень селективности выше, т.е. $0,6 \div 0,7$ с.

В соответствии с /1/ указанное согласование допускается не выполнять.

2.2.4 Защиту от перегрузки с действием на сигнал следует предусматривать на трансформаторах, подверженных перегрузкам, мощностью 0,4 МВ•А и более.

Для подстанций без постоянного дежурного персонала допускается предусматривать действие этой защиты на автоматическую разгрузку или отключение (при невозможности ликвидации перегрузки другими средствами).

Защита от перегрузки устанавливается на двухобмоточных трансформаторах при одинаковой мощности обмоток со стороны питания.

Ток срабатывания защиты силового трансформатора от перегрузки $I_{СЗ,ПЕР}$, А, определяется по выражению

$$I_{СЗ,ПЕР} = k_{ОТС} \cdot I_{НОМ,Т,ВН} / k_V, \quad (2.13)$$

где $k_{ОТС} = 1,05$.

Ток срабатывания реле защиты трансформатора от перегрузки $I_{СР,ПЕР}$, А, определяется по выражению

$$I_{СР,ПЕР} = k_{СХ}^{(3)} \cdot I_{СЗ,ПЕР} / K_I. \quad (2.14)$$

Выдержка времени защиты трансформатора от перегрузки принимается на ступень селективности больше выдержки времени МТЗ от внешних КЗ.

Если процесс пуска или самозапуска ЭД, получающих питание от защищаемого трансформатора, приводит к его перегрузке, то выдержка времени защиты трансформатора от перегрузки должна быть выбрана на 30 % больше продолжительности пуска или самозапуска ЭД.

2.2.5 Газовая защита от повреждений внутри кожуха, сопровождающихся выделением газа, и от понижения уровня масла должна быть предусмотрена:

- для трансформаторов мощностью 6,3 МВ·А и более;
- для внутрицеховых понижающих трансформаторов мощностью 630 кВ·А и более.

Газовую защиту можно также устанавливать на трансформаторах мощностью 1–4 МВ·А.

Газовая защита должна действовать на сигнал при слабом газообразовании и понижении уровня масла и на отключение при интенсивном газообразовании и дальнейшем понижении уровня масла.

Необходимо предусмотреть возможность перевода отключающего элемента газовой защиты на сигнал и выполнения отдельной сигнализации от сигнального и отключающих элементов газового реле.

Конструктивное исполнение газовой защиты с газовым реле типа РГЧЗ-66 подробно рассмотрено в /15–18/. Рекомендуемые уставки по скорости срабатывания газовых реле приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.4 - Уставки по скорости срабатывания газовых реле /15/

Мощность трансформатора, МВ·А, и вид охлаждения	Уставка реле (скорость масла), м/с
До 40 МВ.А включительно, охлаждение М и Д	0,6
Более 40 МВ.А, охлаждение Д	0,9
Независимо от мощности, охлаждение Ц и ДЦ	1,2

2.2.6 Защита от однофазных замыканий на землю на стороне ВН трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ применяется, если между силовым трансформатором и питающими шинами имеется линия (кабельная или воздушная), минимальной протяженностью около 100 м.

Указания по выполнению защиты линии от однофазных замыканий на землю и расчет уставок защиты приведены в пп. 1.2.3.

2.3 Типовая схема защиты силового трансформатора напряжением 6-10/0,4 кВ

Схема защиты силового трансформатора напряжением 6-10/0,4 кВ мощностью 630–2500 кВ·А для сети с компенсированной нейтралью приведена на рисунке 2.1.

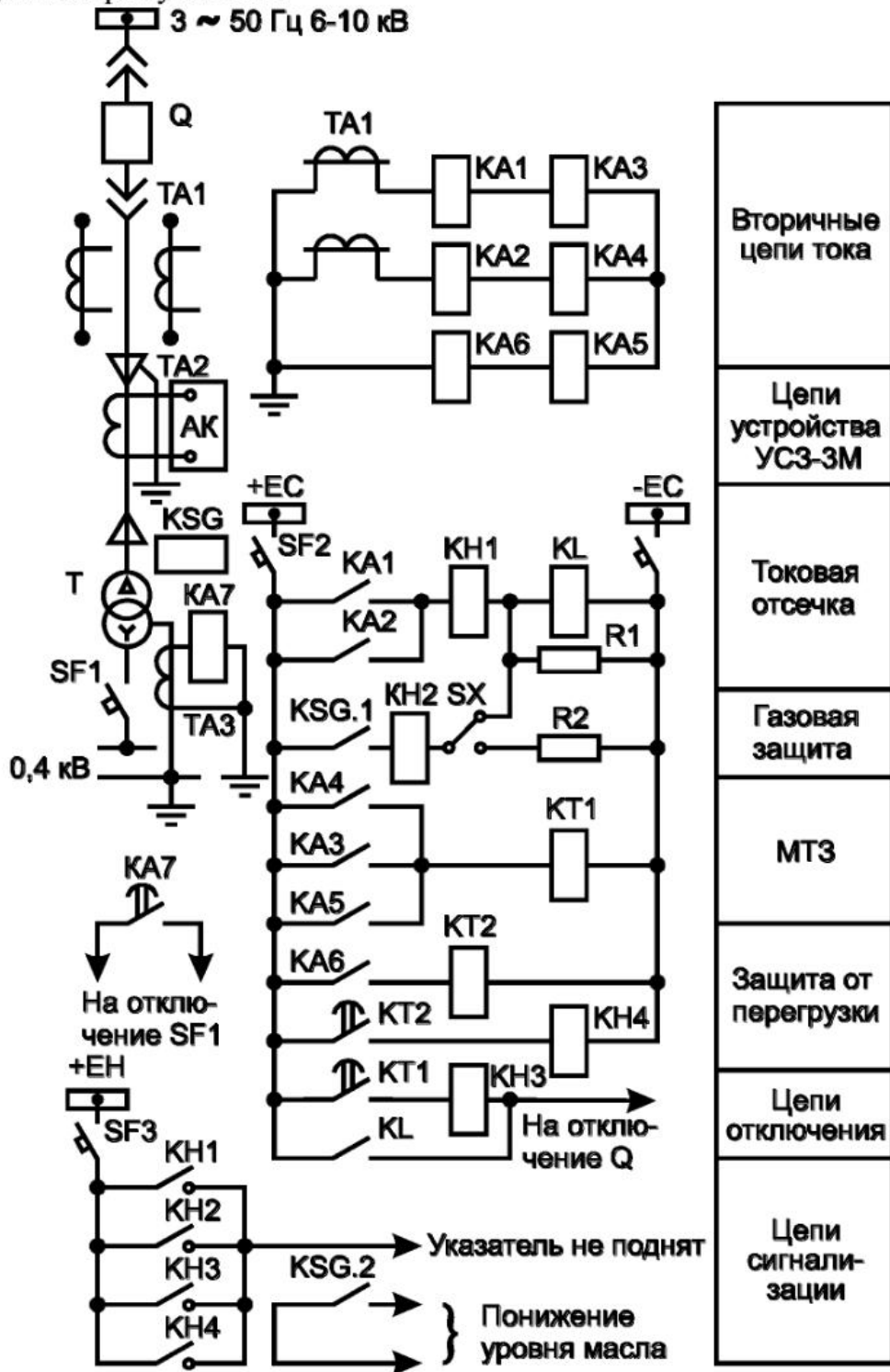


Рисунок 2.1 – Схема защиты силового трансформатора напряжением 6–10/0,4 кВ мощностью 630–2500 кВ·А

Токовая отсечка выполнена по схеме неполной звезды и содержит реле тока КА1, КА2 и указательное реле КН1.

МТЗ выполнена по схеме неполной звезды и содержит реле тока КА3-КА5, реле времени КТ1 и указательное реле КН3.

Специальная защита нулевой последовательности, установленная в нулевом проводе трансформатора, действует на отключение автоматического выключателя SF1, установленного на стороне НН. и содержит трансформатор тока ТА3 и реле тока КА7.

Защита от перегрузки выполнена с действием на сигнал и содержит реле тока КА6, реле времени КТ2 и указательное реле КН4.

Сигнализация об однофазных замыканиях на землю выполнена с помощью устройства типа УСЗ-3М, подключенного к зажимам вторичной обмотки ТТНП ТА2.

Газовая защита выполнена с помощью газового реле KSG. Контакт KSG.1 замыкается при интенсивном выделении газа внутри кожуха трансформатора и значительном снижении уровня масла и действует на отключение выключателя. Контакт KSG.2 служит для сигнализации о слабом газообразовании и небольшом понижении уровня масла. Предусмотрена возможность перевода действия контакта KSG.1 на сигнал с помощью накладки SX и резистора R2. Сигнализация отключения выключателя газовой защитой выполнена при помощи указательного реле КН2.

Резистор R1 устанавливается для обеспечения срабатывания указательных реле КН1, КН2.

В схеме использовано следующее оборудование: Q – выключатель типа ВКЭ-10; SF1, 2 – автоматические выключатели; ТА1 – трансформаторы тока типа ТЛМ-10, ТА2 – ТТНП типа ТЗЛМ; КА1-КА6 – реле тока типа РСТ-40; КА7 – реле тока серии РТ-80; КТ1 – реле времени типа РВ-123; КТ2 – то же, РВ-133; КЛ – реле промежуточное типа РП-23; КН1÷КН4 – реле указательные типа РУ-1; R1, R2 – резистор типа ПЭВ-50.

3 РАСЧЕТ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 КВ

3.1 Объем защиты электродвигателя напряжением выше 1 кВ

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) на электродвигателях напряжением выше 1 кВ должны предусматриваться следующие виды защит:

- от многофазных замыканий;
- от однофазных замыканий на землю;
- от токов перегрузки;
- от потери питания.

На синхронных электродвигателях (СД) должна, кроме того, предусматриваться защита от асинхронного режима, которая может быть совмещена с защитой от токов перегрузки.

3.2 Исполнение и расчет защит электродвигателей

3.2.1 Для защиты электродвигателей (ЭД) от многофазных замыканий должна предусматриваться:

1) токовая однорелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия, включенным на разность токов двух фаз – для ЭД мощностью менее 2 МВт;

2) токовая двухрелейная отсечка без выдержки времени, отстроенная от пусковых токов при выведенных пусковых устройствах, с реле прямого или косвенного действия для ЭД мощностью 2 МВт и более, имеющих действующую на отключение защиту от однофазных замыканий на землю, а также для ЭД мощностью менее 2 МВт, когда защита по п. 1 не удовлетворяет требованиям чувствительности, или когда двухрелейная отсечка оказывается целесообразной по исполнению комплектной защиты или применяемого привода с реле прямого действия.

При отсутствии защиты от однофазных замыканий на землю токовая отсечка ЭД мощностью 2 МВт и более должна выполняться трехрелейной с тремя трансформаторами тока. Допускается защита в двухфазном исполнении с дополнением защиты от двойных замыканий на землю, выполненная с помощью трансформатора тока нулевой последовательности и токового реле;

3) продольная дифференциальная токовая защита – для ЭД мощностью 5 МВт и более, а также менее 5 МВт, если установка токовых отсечек по п. 1 и 2 не обеспечивает выполнения требований чувствительности – в данной курсовой работе (проекте) не рассматривается.

Первичный ток срабатывания отсечки $I_{CO,ЭД}$, А, асинхронного электродвигателя (АД) определяется по выражению

$$I_{CO,ЭД} \geq k_{отс} \cdot I_{пуск}, \quad (3.1)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий влияние апериодической составляющей тока короткого замыкания (КЗ), погрешность реле и необходимый расчетный запас; для реле серии РСТ-40 $k_{отс} = 1,4 \div 1,5$;

$I_{пуск}$ – пусковой ток электродвигателя, А; определяется по формуле

$$I_{пуск} = k_{п} \cdot I_{ном,эд}, \quad (3.2)$$

где $k_{п}$ – кратность пускового тока ЭД;

$I_{ном,эд}$ – номинальный ток ЭД, А.

Первичный ток срабатывания отсечки СД определяется как по формуле (3.1) при значении $k_{отс} = 1,7 \div 1,8$ (для реле серии РСТ-40), так и по выражению

$$I_{со,эд} \geq k_{отс} \cdot I''_д, \quad (3.3)$$

где $k_{отс} = 1,7 \div 1,8$ (для реле серии РСТ-40);

$I''_д$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока СД при внешнем КЗ, А.

Ток $I''_д$, без учета сопротивления кабеля от СД до места установки отсечки, определяется по выражению

$$I''_д \approx \frac{1,05 \div 1,1}{x''_д} I_{ном,эд}, \quad (3.4)$$

где $x''_д$ – сверхпереходное реактивное сопротивление СД, отн. единиц.

Окончательно принимается большее из полученных значений $I_{со,о}$.

Отстройка от тока несинхронного включения при самозапуске в данной курсовой работе (проекте) не рассматривается.

Ток срабатывания реле отсечки $I_{ср}$, А, определяется по выражению

$$I_{ср} = I_{со,эд} \cdot k_{сх}^{(3)} / K_I, \quad (3.5)$$

где $k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$ для токовой однорелейной отсечки;

$k_{сх}^{(3)} = 1$ для токовой двухрелейной отсечки.

При выборе трансформаторов тока ЭД по условию (1.5) $I_{раб,мах} = I_{ном,эд}$. Проверка по стойкости трансформатора тока к токам КЗ в данном курсовом проекте не выполняется.

Чувствительность отсечки электродвигателя оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{ч,то,эд}$, определяемого по формуле

$$k_{\text{ч,ТО,ЭД}} = \frac{I_{\text{к,мин}}^{(2)}}{I_{\text{СР,ЭД}} \cdot K_I}, \quad (3.6)$$

где $I_{\text{к,мин}}^{(2)}$ – действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ на выводах ЭД в минимальном режиме питающей сети по уровню токов КЗ, А.

Согласно [1] должно выполняться условие: $k_{\text{ч}} \geq 2$.

3.2.2 Защита от однофазных замыканий на землю при отсутствии компенсации (в сетях с изолированной нейтралью) предусматривается для ЭД мощностью до 2 МВт при суммарном емкостном токе замыкания на землю $I_{\text{С,Σ}}$ 10 А и более, а для ЭД мощностью более 2 МВт – 5 А и более. Защита выполняется без выдержки времени и действует на отключение ЭД. Ток срабатывания защиты не должен превышать 10 А для ЭД мощностью до 2 МВт и 5 А для ЭД мощностью более 2 МВт. В защите используются трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) типов ТЗЛ и ТЗЛМ.

Защита выполняется с реле типа РТЗ-51. Расчет уставок защиты с реле типа РТЗ-51 рассмотрен в пп. 1.2.3.

Если условие (1.16) не выполняется из-за большого собственного емкостного тока линии, то ТТНП следует перенести к линейным выводам ЭД, а расчет повторить, принимая $I_{\text{С}} = I_{\text{С,д}}$.

При малых токах замыкания на землю (не менее $0,5 \div 1$ А), когда по условиям безопасности необходимо выполнить защиту от замыканий на землю с действием на отключение, применяется направленная защита типа ЗЗП-1. Расчет уставок защиты типа ЗЗП-1 рассмотрен в пп. 1.2.3. При этом значение тока $I_{\text{С}}$ определяется по выражениям (1.19).

Для обеспечения мгновенного отключения ЭД при двойном замыкании на землю (одно – в статоре ЭД, а другое – в сети) во вторичную обмотку ТТНП включается реле тока, например РСТ-40/6 с первичным током срабатывания примерно 100–150 А.

3.2.3 Защита от токов перегрузки предусматривается на ЭД, подверженных перегрузке по технологическим причинам, с действием на сигнал и автоматическую разгрузку механизма, а на ЭД с особо тяжелыми условиями пуска, самозапуска (длительность прямого пуска от сети 20 с и более) – с действием на отключение.

Ток срабатывания реле $I_{\text{СР}}$, А, максимальной токовой защиты от перегрузки выбирается по выражению

$$I_{\text{СР}} = \frac{k_{\text{ОТС}} \cdot k_{\text{СХ}} \cdot I_{\text{НОМ,Д}}}{k_{\text{В}} \cdot K_I}, \quad (3.7)$$

где $k_{отс} = 1,05$ – при действии защиты на сигнал;

$k_{отс} = 1,1 \div 1,2$ – при действии защиты на отключение;

$k_B = 0,85$.

Выдержка времени защиты от перегрузки $t_{сз,п}$ выбирается из условия надежного несрабатывания защиты при пуске или самозапуске ЭД по выражению

$$t_{сз,п} \geq k'_{отс} \cdot t_{п}, \quad (3.8)$$

где $k'_{отс} = 1,2 \div 1,3$;

$t_{п}$ – время пуска для ЭД, не подлежащих самозапуску, или время самозапуска для самозапускающихся ЭД, с.

3.2.4 Защита от потери питания устанавливается на ЭД, которые:

– не подлежат самозапуску по технологическим причинам или правилам техники безопасности;

– необходимо отключить для обеспечения самозапуска более ответственных ЭД;

– подлежат отключению во избежание повторного пуска после останова из-за длительного (более 10 с) отсутствия напряжения при перерыве электроснабжения;

– подлежат отключению или развозбуждению для предотвращения возможного несинхронного включения этих ЭД на параллельную работу с сетью;

– подлежат отключению или развозбуждению для ограничения или ликвидации подпитки места КЗ в питающей сети.

Защита от потери питания выполняется обычно групповой (один комплект защиты на несколько присоединений) и действует на отключение ЭД или их развозбуждение (для СД).

В качестве защиты от потери питания применяют:

а) одно-, двух- или трехступенчатую защиту минимального напряжения (обычно двухступенчатую);

б) защиту минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности;

в) вспомогательные контакты выключателя линии, питающей секцию сборных шин, к которой подключены ЭД, или выходные цепи защит, действующих на отключение данного выключателя.

Защита минимального напряжения предусматривается в тех случаях, когда суммарная номинальная мощность СД не превышает 10 % общей мощности одновременно работающих ЭД.

Напряжение срабатывания первой ступени защиты $U_{сз}^I$, кВ, предназначенной для отключения несамозапускающихся ЭД, определяется по выражению

$$U_{сз}^I \approx 0,7U_{ном}, \quad (3.9)$$

а выдержка времени срабатывания первой ступени защиты t_{C3}^I принимается большей времени действия основных защит элементов сети от многофазных КЗ, $t_{C3}^I = 0,5 \div 1,5$ с.

Напряжение срабатывания второй ступени защиты U_{C3}^{II} , кВ, действующей на отключение при длительном отсутствии напряжения, и третьей ступени U_{C3}^{III} , кВ, подготавливающей самозапуск ответственных механизмов (т.е., действующей на гашение поля СД, подлежащих самозапуску), определяется по выражению

$$U_{C3}^{II} = U_{C3}^{III} \leq \frac{U_{C3П}}{k_{ОТС} \cdot k_B}, \quad (3.10)$$

где $U_{C3П}$ – напряжение в месте установки защиты в режиме самозапуска (см. приложение В), кВ;

$k_{ОТС} = 1,2$ (для реле минимального напряжения типа РН-54/160);

$k_B = 1,25$ (для реле минимального напряжения типа РН-54/160).

Выдержка времени срабатывания второй ступени защиты t_{C3}^{II} устанавливается $t_{C3}^{II} = 9 \div 10$ с. Выдержка времени срабатывания третьей ступени защиты t_{C3}^{III} принимается на $\Delta t = 0,5$ с больше времени действия защит при КЗ, в зоне действия которых для остаточного напряжения $U_{ОСТ}$ в месте установки защиты минимального напряжения справедливо условие $U_{ОСТ} < U_{C3}$.

Защита минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности предусматривается в дополнение к защите минимального напряжения, когда в сети имеются СД суммарной мощностью, превышающей 10 % общей мощности всех одновременно работающих ЭД, а также в тех случаях, когда при наличии СД требуется как можно больше сократить время перерыва питания.

Частота срабатывания защиты минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности принимается равной $f_{СР} = 48,5 \div 49$ Гц, а выдержка времени – $0,3 \div 0,5$ с из условия несрабатывания при кратковременных снижениях частоты во время КЗ.

3.2.5 Защита от асинхронного режима устанавливается на всех СД и действует:

а) с выдержкой времени на запуск схемы ресинхронизации и автоматическую разгрузку механизма до такой степени, чтобы обеспечить втягивание СД в синхронизм, если синхронизация допустима;

б) на отключение СД и повторный автоматический пуск;

в) на отключение СД при невозможности ресинхронизации или повторного автоматического пуска.

Защита от перегрузки и асинхронного режима может быть выполнена совмещенной. При этом ток срабатывания реле защиты выбирается по выражению (3.7) с учетом $k_{отс} = 1,1 \div 1,2$.

Время действия первой ступени защиты, действующей на перевод СД в асинхронный режим без возбуждения и на разгрузку механизма, принимается на ступень селективности больше времени отключения КЗ в сети, сопровождающихся протеканием в месте установки защиты тока $I > I_{сз}$, но не менее 1,5 с.

Время действия второй ступени защиты, действующей на отключение, определяется по выражению (3.8).

3.3 Типовые схемы защит электродвигателей

3.3.1 Схема защиты асинхронного электродвигателя. Схема защиты АД мощностью менее 2000 кВт приведена на рисунках 3.1, 3.2.

Токовая отсечка выполнена с одним реле КА1, включенным на разность токов двух фаз трансформаторов тока ТА1.

Защита от замыканий на землю выполнена с реле КА3 типа РТЗ-51, которое подключено к ТТНП ТА2 типа ТЗЛМ.

Защита от перегрузки с независимой характеристикой выдержки времени (реле тока КА2, реле времени КТЗ, указательное реле КН4) выполнена с действием на отключение.

Промежуточное реле КЛ1 подключено к шинкам +ЕС2 первой ступени защиты минимального напряжения.

Выходное промежуточное реле КЛ2 после срабатывания самоудерживается по цепи контакта КЛ2.1, а его замыкающий контакт КЛ2.2 при замыкании действует на отключение выключателя Q. Резистор R служит для обеспечения срабатывания указательных реле КН2–КН4.

В схеме (рисунок 3.1, 3.2) использовано следующее оборудование: Q – выключатель типа ВКЭ-10; TV – трансформатор напряжения; ТА1 – трансформаторы тока типа ТЛМ-10, ТА2 – трансформатор тока типа ТЗЛМ; КА1, КА2 – реле тока типа РСТ-40; КА3 – реле тока типа РТЗ-51; КТ – реле времени типа ВЛ-23; КЛ1, КЛ2 – реле промежуточные типа РП-23; КН1-КН4 – реле указательные типа РУ-1; R – резистор типа ПЭВ-50; SB – кнопка управления типа КЕ-011.

3.3.2 Схема защиты синхронного электродвигателя

Схема защиты СД номинальной мощностью менее 5000 кВт представлена на рисунках 3.3, 3.4. Суммарный емкостный ток замыкания на землю менее 5 А. Самозапуск не предусматривается.

Токовая отсечка выполнена в двух фазах с трансформаторами тока ТА1 и реле тока КА1, КА2.

Вторичная обмотка ТТНП ТА2 подключена к общей для распределительного устройства системе сигнализации замыканий на землю АК

типа УСЗ-3М. К вторичной обмотке ТА2 подключено реле тока КА4, мгновенно отключающее СД при двойных замыканиях на землю.

Защита от перегрузки и асинхронного режима выполнена совмещенной. В цепь контакта КЛ5.2 реле-повторителя КЛ5 реле тока КА3, срабатывающего при увеличении тока статора ЭД, включен контакт КФ, размыкающийся при форсировке возбуждения. В выходных цепях защиты от потери питания предусмотрено промежуточное реле КЛ1, действующее на отключение выключателя Q и гашение поля.

Контакт КQC замыкается при включении выключателя Q. Контакт КАР замыкается при снижении тока возбуждения.

Во избежание срабатывания реле КЛ6 в процессе пуска или самозапуска первая ступень защиты выводится из работы с помощью реле КЛ4, контролирующего этот процесс по уровню тока статора, который задается уставкой реле КА3.

Оборудование, использованное в схеме защиты: Q – выключатель типа ВКЭ-10; TV – трансформатор напряжения; ТА1 – трансформаторы тока типа ТЛМ-10, ТА2 – трансформатор тока типа ТЗЛМ; КА1–КА3 – реле тока типа РСТ-40; КА4 – реле тока типа РСТ-40/6; КТ – реле времени типа ВЛ-34; КЛ1, КЛ3, КЛ4 – реле промежуточные типа РП-23; КЛ5, КЛ6 – то же, типа РП-252; КН1–КН4 – реле указательные типа РУ-1; R – резистор типа ПЭВ-50; SB – кнопка управления типа КЕ-011.

3.3.3 Схема групповой защиты минимального напряжения и минимальной частоты.

Схема групповой защиты минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности представлена на рисунках 3.5, 3.6.

Защита минимального напряжения выполнена как на рисунке 3.1.

В защите минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности предусмотрены реле понижения частоты КФ и реле направления мощности КW1 и КW2, токовые обмотки которых КW1.1 и КW2.1 подключены к трансформаторам тока ТА1 выключателя Q1 ввода секции шин. Обмотки напряжения КW1.2 и КW2.2 включены во вторичные цепи трансформатора напряжения TV через замыкающие контакты КЛ2.1 и КЛ2.2 реле КЛ2 – повторителя реле КФ. Это выполнено для снижения нагрузки на трансформатор напряжения и во избежание приваривания контактов реле КW1, КW2. Реле КW1 и КW2 включаются так, чтобы при направлении мощности от источника питания к потребителю контакты реле были замкнуты.

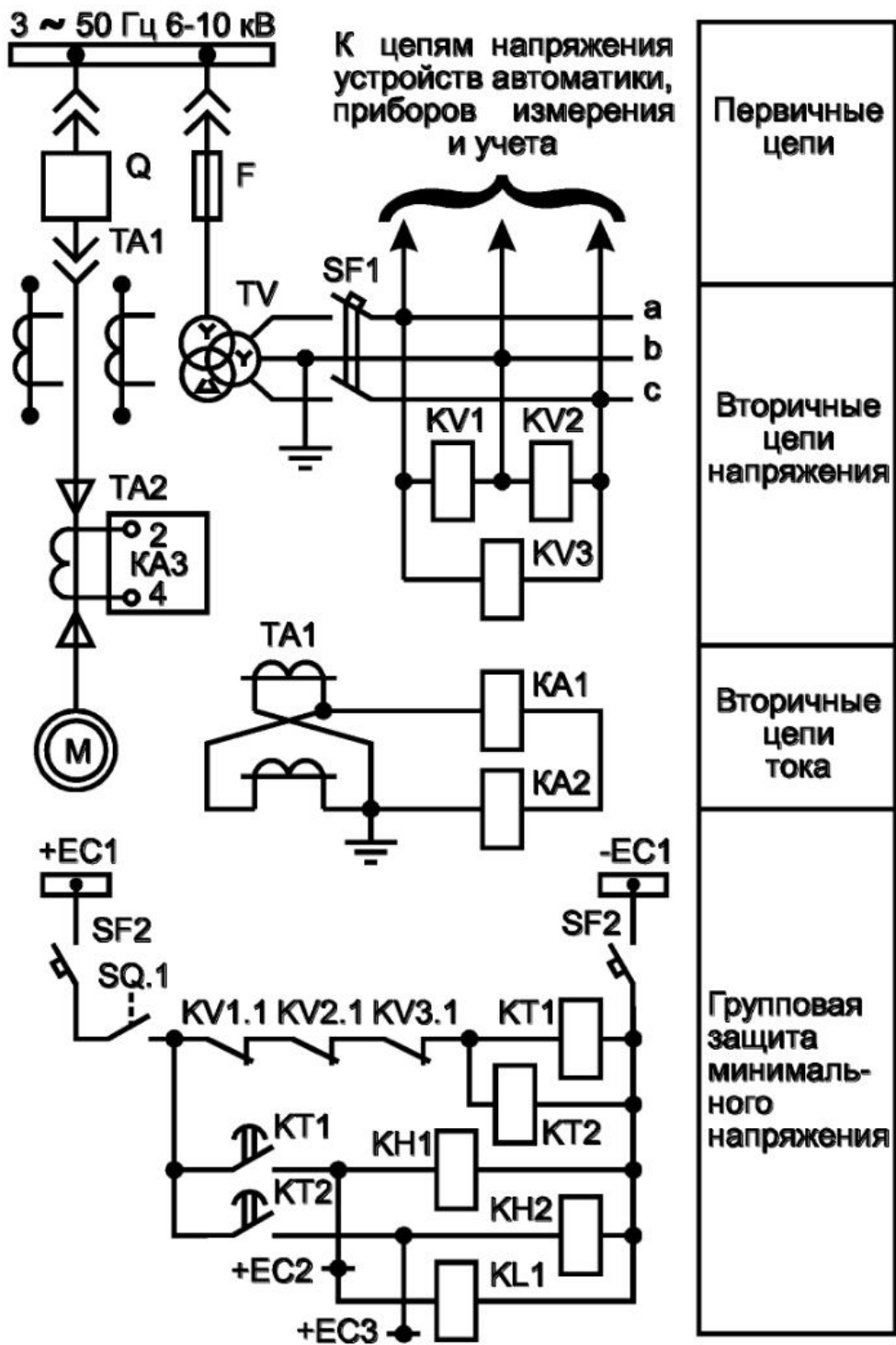


Рисунок 3.1 – Схема защиты асинхронного электродвигателя мощностью менее 2000 кВт. Вторичные цепи тока, напряжения и защита минимального напряжения

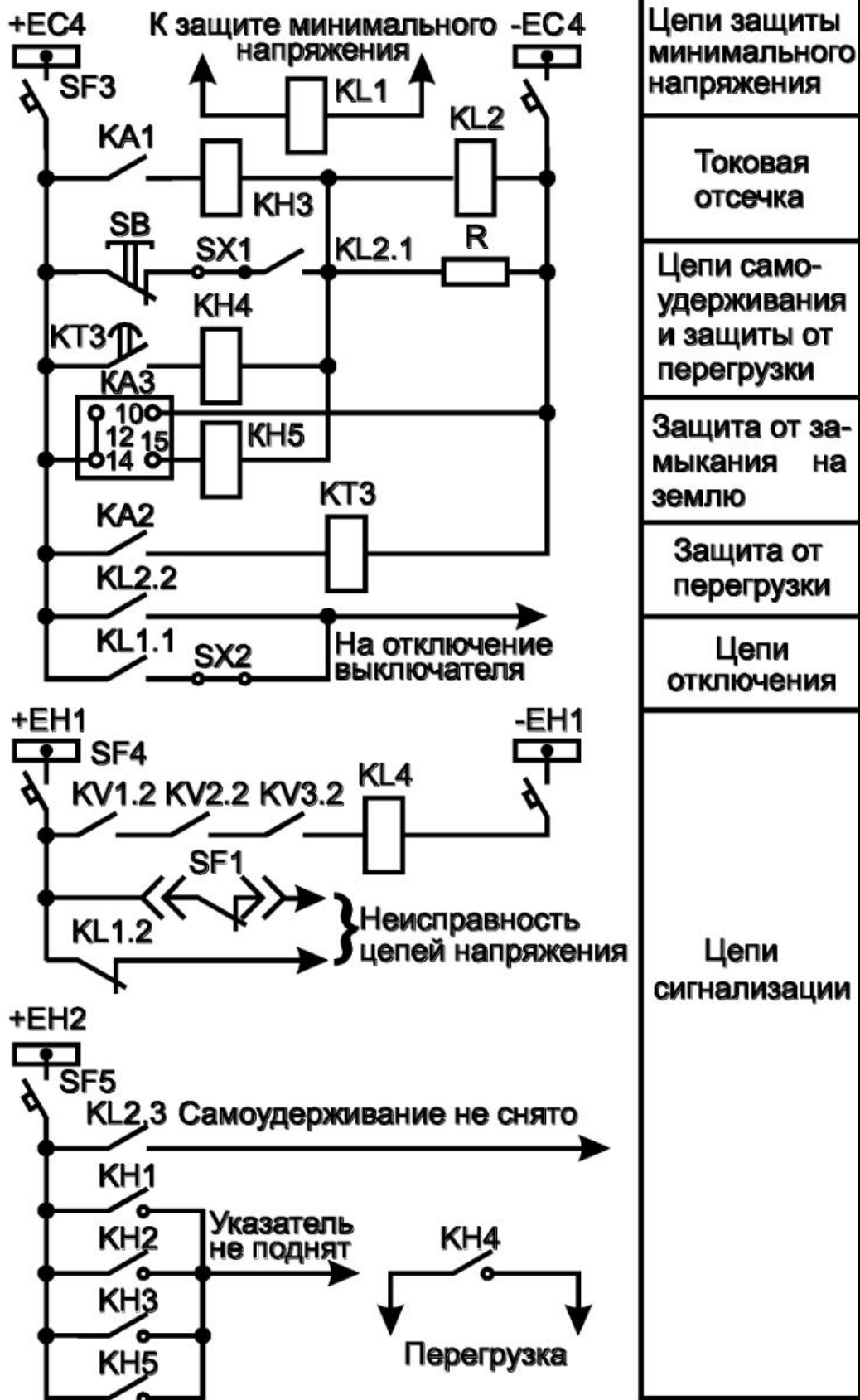


Рисунок 3.2 – Цепи оперативного тока и сигнализации

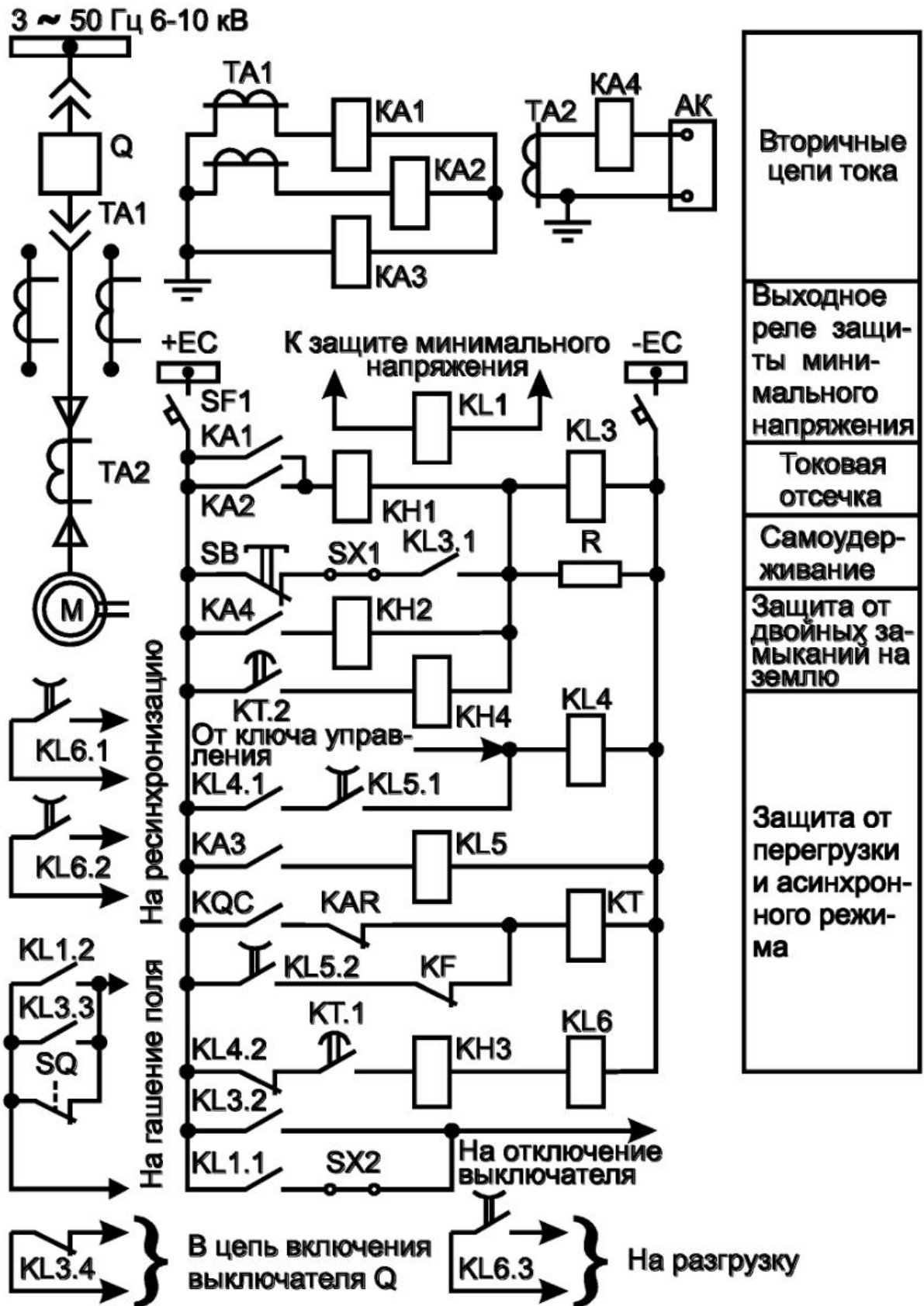


Рисунок 3.3 – Схема защиты синхронного электродвигателя мощностью менее 5000 кВт. Вторичные цепи тока и цепи оперативного тока

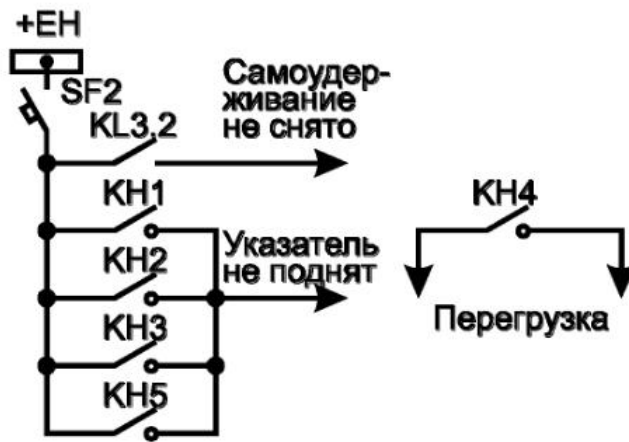


Рисунок 3.4 – Цепи сигнализации

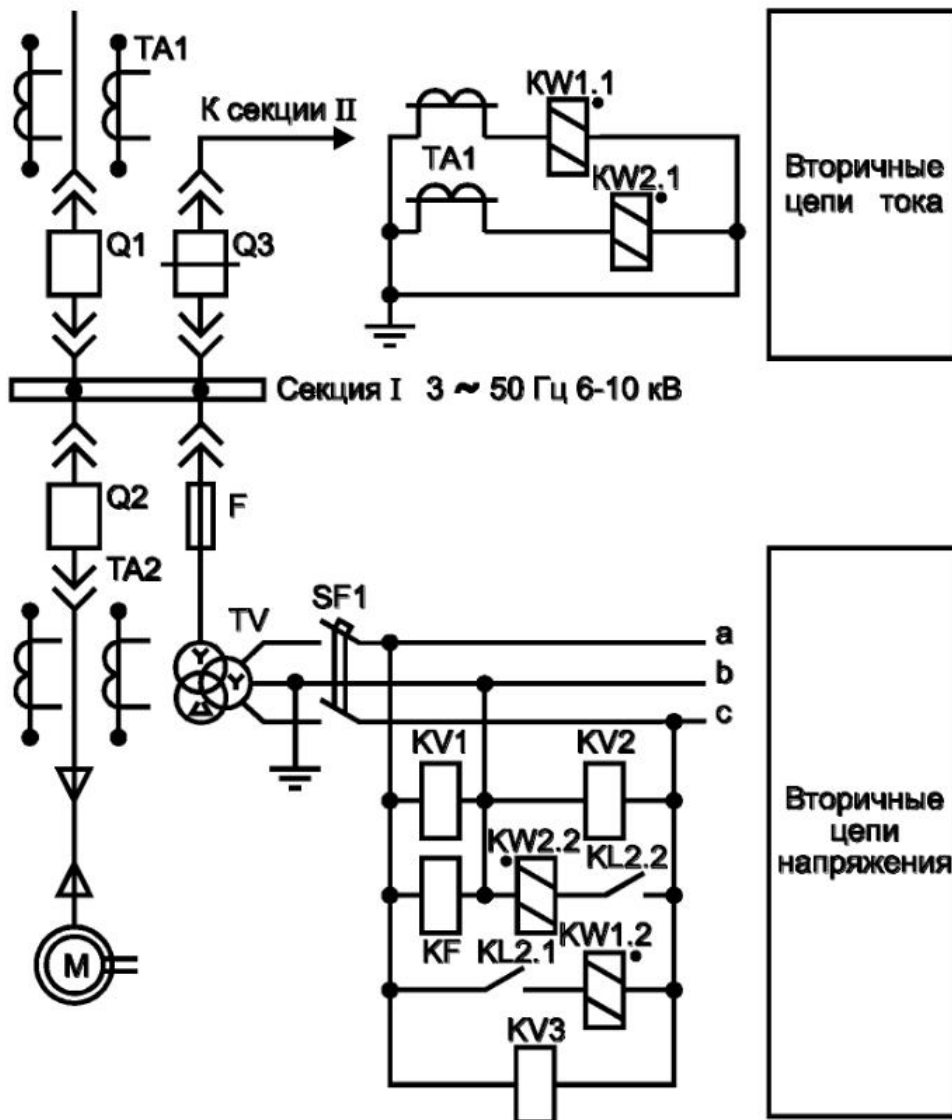


Рисунок 3.5 – Схема групповой защиты минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности. Вторичные цепи тока и напряжения

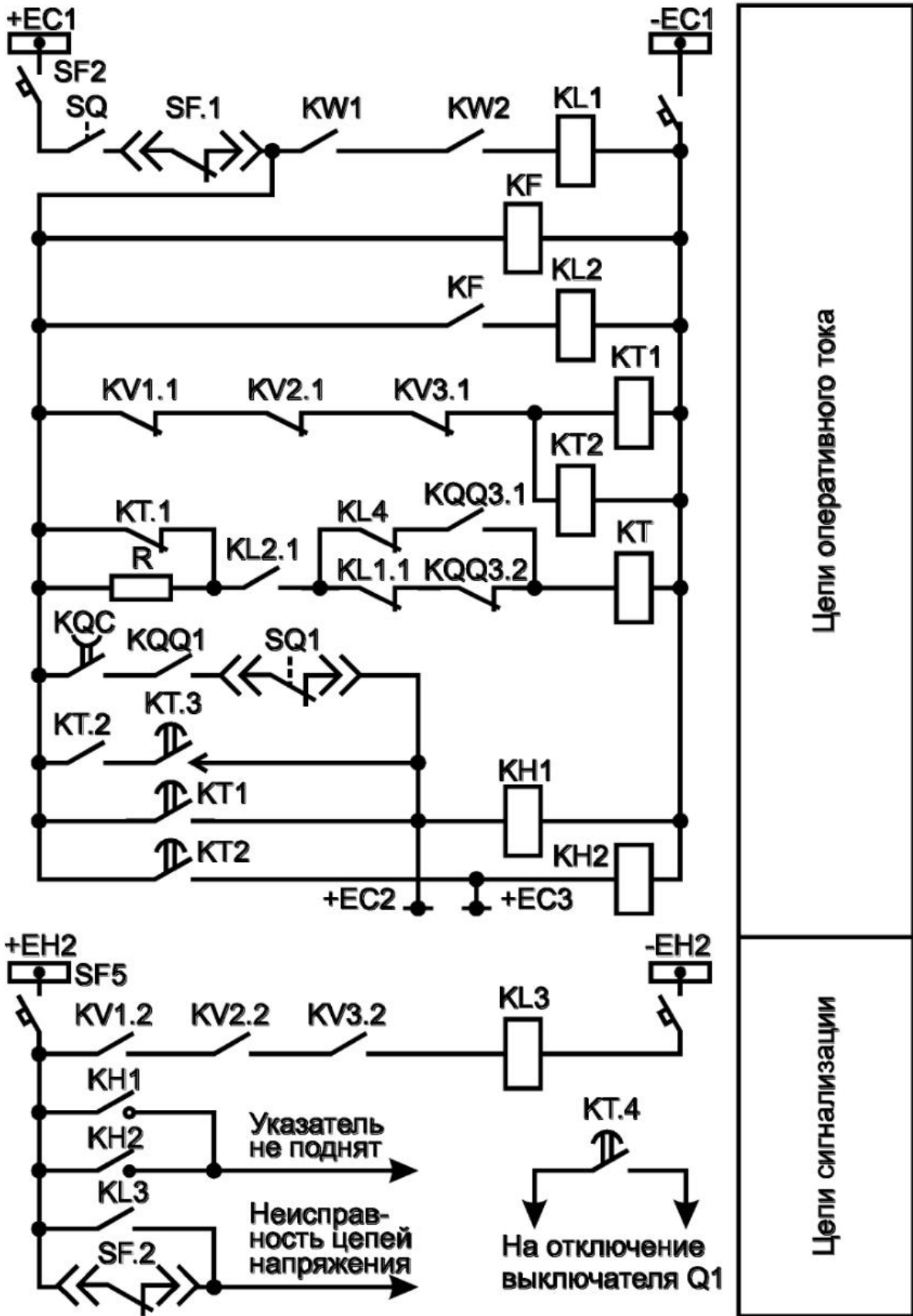


Рисунок 3.6 – Цепи оперативного тока и сигнализации

При снижении частоты и направлении мощности от потребителя к источнику питания замыкаются контакты KL2.1, KL1.1, реле времени КТ срабатывает и через контакты КТ.2 и КТ.3 до истечения $0,3 \div 0,5$ с подает импульс на отключение или развозбуждение ЭД через шинки первой ступени защиты минимального напряжения. По истечении $0,3 \div 0,5$ с замыкается контакт КТ.4 реле времени КТ и отключает выключатель Q секции I, запуская устройство АВР.

Для обеспечения работоспособности защиты, когда выключатель ввода секции I отключен, а ЭД получают питание от секции II через замкнутый секционный выключатель Q3, в цепь обмотки реле времени КТ включены контакты промежуточного реле KL4– повторителя реле направления мощности защиты от потери питания секции II (аналог контакта KL1 защиты секции I) и контакты, фиксирующее положение секционного выключателя KQQ3.1, KQQ3.2.

При отключении выключателя Q1 защита от потери питания через контакты: KQC реле положения выключателя Q1 "Включено" и KQQ1 реле фиксации включенного положения Q1 действует на отключение или развозбуждение ЭД без выдержки времени. Оборудование, указанное в схеме защиты: Q – выключатель типа ВКЭ-10; TV – трансформатор напряжения; SF – автомат; TA1, TA2 – трансформаторы тока типа ТЛМ-10; KV1- KV3 – реле напряжения типа РН-54/160; KW1, KW2 – реле направления мощности типа РБМ-171/1; KF – реле частоты типа РЧ-1; КТ – реле времени типа РВ-122; КТ1 – то же, РВ-123; КТ2 – то же, РВ-133; KL 1–3 – реле промежуточные типа РП-23; КН1, КН2 – реле указательные типа РУ-1; R – резистор типа ПЭВ-50; SQ – концевой выключатель тележки трансформатора напряжения; SQ1 – блок-контакт привода выключателя Q1; KQQ1, KQQ3 – поляризованные реле типа РП-8 или РП-11.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок , изд. 7-е: общие правила; передача электроэнергии; распределительные устройства и подстанции; электрическое освещение; электрооборудование специальных установок – М.: ЭНАС, 2013. – 560 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 96 с.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 3. Защита шин 6-220 кВ станций и подстанций. – М.-Л: Госэнергоиздат, 1961. – 72 с.
5. Справочник по релейной защите / Под общ. ред. М.А. Берковича. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 512 с.
6. Андреев В.А. Релейная защита систем электроснабжения: в примерах и задачах / В.А. Андреев. – М.: Высш. шк., 2008. – 252 с.
7. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев. – М.: МЭИ, 2008.
8. Сазькин В.Г., Кудряков А.Г. Электромагнитные переходные процессы: учебник. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 250 с.
9. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2015. – 296 с.
10. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 248 с.
11. Шабад М.А. Защита трансформаторов 10 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 144 с.
12. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – М.: БИБКОН, ТРАНСЛОГ, 2015. – 656 с. (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений)
13. Базы данных по электрическим сетям и оборудованию: <http://www.online-electric.ru/dbase.php>.
14. Гуревич, В.И. Электрические реле: устройство, принцип действия и применения: учебн. пособие / В.И. Гуревич // Москва: СОЛОН-Пресс, 2019. – 425 с..

15. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 496 с.
16. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
17. Программные продукты – онлайн-расчеты уставок релейной защиты: <http://www.online-electric.ru/rza/>.
18. Ершов, А.М. Релейная защита в системах электроснабжения напряжением 0,38-110 кВ: учебн. пособие / А.М. Ершов // Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 608 с.
19. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Масенко А.В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: метод. указания к выполнению курсовой работы. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 55 с.
20. Глазырин, В.Е. Микропроцессорные релейные защиты блока генератор-трансформатор: учебн. пособие / В.Е. Глазырин // Новосиб.: НГТУ, 2014. – 157 с.
21. Козлов, А.Н. Релейная защита и автоматика электрических систем: учебн. пособие / А.Н. Козлов, В.А. Козлов, Ю.П. Мясоедов // Благовещенск : Изд-во АмГУ «ЭНАС», 2017. – 221 с.
22. Фигурнов, Е.П. Релейная защита. В 2-х частях. Часть 1. Основы релейной защиты: учебник / Е.П. Фигурнов // Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. – 321 с.

Приложение А
Задание на курсовую работу
А.1 Форма задания на курсовую работу

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н.И. Вавилова»
Институт Инженерии и робототехники
Кафедра Электрооборудование, энергоснабжение и роботизация

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой _____/Бакиров С.М./

«___» _____ 202__ г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение курсовой работы по дисциплине «Релейная защита
и автоматизация электроэнергетических систем»

Тема курсовой работы:

«_____»

Ф.И.О. _____ Группа _____

Тема работы: Релейная защита систем электроснабжения агропромышленного предприятия

Содержание задания: Расчет уставок защит элементов системы электроснабжения промышленного предприятия согласно рисунку А.1 и таблицам А.1-А.6.

Объем работы (проекта):

а) пояснительная записка к работе:

1) курсовая работа – 30 страниц формата А4.

б) графическая часть:

1) курсовая работа – 1 лист формата А1.

Срок выполнения работы: с «__» _____ 20__ г. по «__» _____ 20__ г.

Срок защиты: «__» _____ 20__ г.

Дата выдачи задания: «__» _____ 20__ г.

Дата сдачи работы на кафедру: «__» _____ 20__ г.

Руководитель работы
(должность)

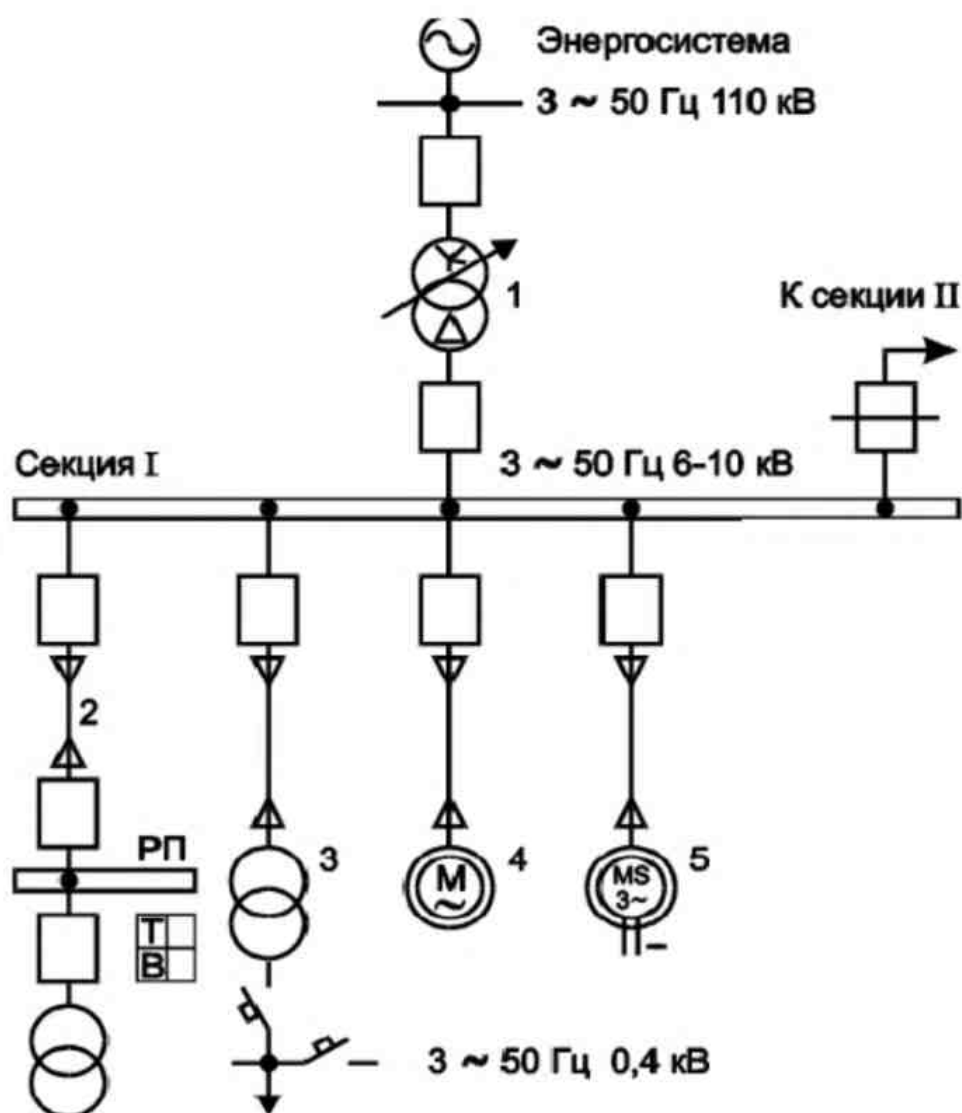
(подпись, дата)

(и.о., фамилия)

Задание принял

(подпись, дата)

(и.о., фамилия)



РП – распределительный пункт 6–10 кВ

Рисунок А.1 – Схема электроснабжения предприятия

А.2 Варианты задания

Варианты задания и исходные данные приведены в таблицах А.1 – А.7. Курсовая работа должна содержать:

- расчет уставок защит элементов 2–5 схемы рисунка А.1;
- упрощенную структурную схему системы электроснабжения агропромышленного предприятия (2 секции шин), схему защит элементов 2-5 (рисунок А.1) – лист формата А1 графической части.

Таблица А.1 – Варианты задания

Вариант задания	S_K'' , МВ·А	$U_{НН}$, кВ	Элементы системы электроснабжения согласно рисунку А.1				
			1	2	3	4	5
			1	55	6	T1	W1
2	70	10	T2	W2	T5	M2	MS3
3	650	6	T3	W3	T4	M3	MS4
4	85	10	T1	W4	T6	M1	MS2
5	100	6	T2	W5	T5	M2	MS3
6	200	10	T3	W6	T4	M3	MS4
7	125	6	T1	W7	T5	M4	MS5
8	85	10	T2	W8	T6	M5	MS6
9	450	6	T3	W9	T4	M6	MS7
10	75	10	T1	W10	T5	M4	MS5
11	95	6	T2	W11	T6	M5	MS6
12	250	10	T3	W12	T4	M6	MS7
13	105	6	T1	W13	T4	M5	MS2
14	75	10	T2	W14	T5	M3	MS1
15	550	6	T3	W15	T6	M1	MS9
16	65	10	T1	W16	T4	M1	MS9
17	90	6	T2	W17	T5	M3	MS1
18	300	10	T3	W18	T6	M5	MS9
19	95	6	T1	W19	T4	M1	MS8
20	80	10	T2	W20	T6	M3	MS2
21	200	6	T3	W9	T5	M5	MS4
22	115	10	T1	W10	T4	M2	MS8
23	70	6	T2	W21	T6	M3	MS9
24	500	10	T3	W22	T5	M4	MS1
25	60	6	T1	W23	T6	M5	MS1
26	90	10	T2	W24	T6	M6	MS3
27	350	6	T3	W25	T6	M7	MS4
28	130	10	T1	W26	T5	M8	MS5
29	100	6	T2	W27	T5	M9	MS6
30	400	10	T3	W28	T5	M1	MS7
31	90	6	T1	W29	T4	M2	MS6
32	75	10	T2	W30	T4	M3	MS5
33	200	6	T3	W17	T4	M4	MS9

Продолжение таблицы А.1

Вариант задания	S_K'' , МВ·А	$U_{НН}$, кВ	Элементы системы электроснабжения согласно рисунку А.1				
			1	2	3	4	5
34	120	10	T1	W31	T6	M5	MS3
35	80	6	T2	W32	T6	M6	MS2
36	500	10	T3	W28	T6	M7	MS1
37	80	6	T1	W13	T5	M8	MS1
38	95	10	T2	W33	T5	M9	MS2
39	300	6	T3	W34	T5	M6	MS9
40	110	10	T1	W33	T4	M2	MS4
41	80	6	T2	W36	T4	M2	MS5
42	600	10	T3	W35	T4	M5	MS7
43	70	6	T1	W29	T5	M4	MS2
44	95	10	T2	W37	T6	M5	MS8
45	200	6	T3	W5	T5	M8	MS9
46	100	10	T1	W8	T4	M1	MS5
47	80	6	T2	W11	T5	M3	MS7
48	500	10	T3	W38	T6	M9	MS8
49	50	6	T1	W39	T4	M1	MS4
50	100	10	T2	W14	T5	M4	MS3

Примечания
 1 S_K'' – мощность КЗ на шинах энергосистемы.
 2 $U_{НН}$ – номинальное низшее напряжение ГПП

Таблица А.2 – Технические данные трансформаторов 110/6-10 кВ

Позиция	Тип	$U_{НОМ,Т}$, кВ		ΔU , ед.	u_K , %	Схема и группа соединения обмоток
		ВН	НН			
T1	ТМН-6300/110	115	6,6; 11	$\pm 0,16$	10,5	$Y_H/\Delta - 11$
T2	ТДН-10000/110	115	6,6; 11	$\pm 0,16$	10,5	$Y_H/\Delta - 11$
T3	ТДН-16000/110	115	6,6; 11	$\pm 0,16$	10,5	$Y_H/\Delta - 11$

Примечание – u_K – напряжение короткого замыкания

Таблица А.3 – Технические данные кабельной линии электропередачи напряжением 6-10 кВ от шин НН ГПП к РП

Поз.	Кол. линий	$U_{НОМ}$, кВ	F, мм ²	$I_{доп}$, А	R_0 , Ом/км	X_0 , Ом/км	l , км	Трансформатор			
								поз.	кол.	МТЗ	
										$I_{с3}$, А	$t_{с3}$, с
W1	1	6	150	300	0,206	0,074	1,0	T4	6	115	0,5
W2	1	10	185	310	0,167	0,077	2,0	T6	2	175	0,9
W3	2	6	120	260	0,258	0,076	0,9	T6	5	300	1,0

Продолжение таблицы А.3

Поз.	Кол. линий	U _{НОМ} , кВ	F, мм ²	I _{доп} , А	R ₀ , <u>Ом</u> км	X ₀ , <u>Ом</u> км	I, км	Трансформатор			
								поз.	кол.	МТЗ	
										I _{сз} , А	t _{сз} , с
W4	1	10	95	205	0,326	0,083	2,5	T5	4	110	0,7
W5	2	6	150	300	0,206	0,074	0,7	T5	4	180	0,8
W6	3	10	185	310	0,167	0,077	1,4	T6	5	175	0,9
W7	1	6	120	260	0,258	0,076	0,8	T5	3	180	0,6
W8	1	10	150	275	0,206	0,079	1,6	T5	6	110	0,7
W9	4	6	120	260	0,258	0,076	0,6	T6	2	175	1,0
W10	1	10	50	140	0,620	0,090	3,0	T5	2	110	0,8
W11	1	6	185	340	0,167	0,073	1,2	T4	8	115	0,5
W12	2	10	150	275	0,206	0,079	2,4	T5	6	110	0,6
W13	1	6	120	260	0,258	0,076	0,5	T4	5	115	0,7
W14	1	10	185	310	0,167	0,077	1,5	T4	12	70	0,5
W15	2	6	185	340	0,167	0,073	1,3	T5	5	180	0,8
W16	1	10	50	140	0,620	0,090	3,0	T4	3	70	0,6
W17	2	6	185	340	0,167	0,073	1,4	T6	3	300	0,9
W18	1	10	240	355	0,129	0,075	0,7	T5	10	110	0,8
W19	1	6	70	190	0,443	0,080	0,8	T4	3	115	0,5
W20	1	10	240	355	0,129	0,075	2,2	T6	6	175	1,1
W21	1	6	185	340	0,167	0,073	1,1	T6	3	300	0,9
W22	2	10	185	310	0,167	0,077	1,9	T5	7	110	0,7
W23	1	6	120	260	0,258	0,076	0,9	T6	2	300	0,8
W24	2	10	95	205	0,326	0,083	1,8	T4	6	70	0,6
W25	3	6	150	300	0,206	0,074	0,6	T4	6	115	0,7
W26	1	10	35	115	0,890	0,095	3,5	T4	2	70	0,8
W27	1	6	95	225	0,326	0,078	1,2	T4	4	115	0,9
W28	2	10	150	275	0,206	0,079	2,1	T6	4	175	1,2
W29	1	6	95	225	0,326	0,078	1,1	T5	2	180	0,7
W30	1	10	185	310	0,167	0,077	1,5	T5	7	110	0,6
W31	1	10	70	165	0,443	0,086	1,4	T4	5	70	0,5
W32	2	6	120	260	0,258	0,076	0,8	T4	5	115	0,8
W33	1	10	120	240	0,258	0,081	1,7	T6	3	175	0,9
W34	2	6	185	340	0,167	0,073	0,7	T4	7	115	0,5
W35	2	10	150	275	0,206	0,079	2,5	T4	6	70	0,6
W36	3	6	95	225	0,326	0,078	1,2	T4	6	115	0,7
W37	1	10	70	165	0,443	0,076	1,6	T6	2	175	0,8
W38	1	10	150	275	0,206	0,079	1,1	T6	4	175	0,9
W39	1	6	240	390	0,129	0,071	1,3	T5	6	180	1,0

Таблица А.4 - Технические данные трансформаторов б-10/0,4 кВ

Позиция	Тип	U _{НОМ} , кВт	u _к , %	Схема и группа соединения обмоток	Линия	
					l, км	F, мм ²
Т4	ТМ-400/10	6	4,5	Δ/Y _Н -11	0,5	16
	ТМ-400/10	10	4,5	Δ/Y _Н -11	1,0	16
Т5	ТМ-630/10	6	5,5	Δ/Y _Н -11	1,5	25
	ТМ-630/10	10	5,5	Δ/Y _Н -11	2,0	16
Т6	ТМ-1000/10	6	5,5	Δ/Y _Н -11	2,5	50
	ТМ-1000/10	10	5,5	Δ/Y _Н -11	3,0	25

Таблица А.5 – Технические данные асинхронных электродвигателей

Позиция	Тип	P _{НОМ} , кВт	cos φ	U _{НОМ} , кВ	I _{НОМ} , А	k _П	t _П , с	Линия	
								l, км	F, мм ²
М1	4А3М-630-УХЛ4	630	0,85	6	72,0	5,3	15,0	1,3	50
			0,88	10	42,9	6,0			35
М2	4А3М-800-УХЛ4	800	0,9	6	90,0	5,3	12,7	1,2	70
			0,91	10	54,9	6,6			35
М3	4А3М-1000-УХЛ4	1000	0,87	6	112,5	5,3	9,5	1,1	70
			0,88	10	68,3	6,0			50
М4	4А3М-1250-УХЛ4	1250	0,89	6	140,0	5,5	8,0	1,0	95
			0,9	10	85,1	6,0			70
М5	4А3М-1600-УХЛ4	1600	0,92	6	179,0	5,2	6,8	0,9	120
			0,93	10	109,0	4,6			70
М6	4А3М-2000-УХЧ4	2000	0,92	6	226,0	4,7	5,6	0,8	150
			0,95	10	134,0	5,0			95
М7	4А3М-2500-УХЛ4	2500	0,88	6	279,0	5,0	8,7	0,7	185
			0,9	10	167,0	6,0			120
М8	4А3М-3150-УХЛ4	3150	0,87	6	346,0	5,3	7,2	0,6	150x2
			0,89	10	213,0	5,4			150
М9	4А3М-4000-УХЛ4	4000	0,88	6	444,0	5,7	6,0	0,5	150x2
			0,92	10	268,0	5,4			185

Примечание – t_П – допустимое время пуска; принято по каталожным данным равновеликих синхронных электродвигателей.

Таблица А.6 – Технические данные синхронных электродвигателей

Пози- ция	Тип	P _{НОМ} , кВт	U _{НОМ} , кВ	I _{НОМ} , А	k _П	t _П , с	Линия	
							l, км	F, мм ²
MS1	СГД-630-23УХЛ4	630	6	71	5,66	15,0	1,0	50
			10	42				35
MS2	СТД-800-23УХЛ4	800	6	90	5,58	12,7	0,9	70
			10	54				35
MS3	СТД-1000-23УХЛ4	1000	6	112	6,70	9,5	0,8	70
			10	67				50
MS4	СТД-1250-23УХЛ4	1250	6	140	6,48	8,0	0,7	95
			10	84				70
MS5	СТД-1600-23УХЛ4	1600	6	178	6,79	6,8	0,6	120
			10	107				70
MS6	СТД-2000-23УХЛ4	2000	6	221	6,91	5,6	0,5	150
			10	133				95
M37	СТД-2500-23УХЛ4	2500	6	276	6,16	8,7	0,4	185
			10	166				120
MS8	СТД-3150-23УХЛ4	3150	6	354	6,63	7,2	0,3	150x2
			10	213				150
MS9	СГД-4000-23УХЛ4	4000	6	439	6,69	6,0	0,2	150x2
			10	263				185

Приложение Б

(справочное)

Расчет токов коротких замыканий

Б.1 Методика расчета токов коротких замыканий

В заданных вариантах точек необходимо определить действующее начальное значение периодической составляющей трехфазного тока короткого замыкания [8].

Удельное индуктивное сопротивление КЛЭП принимается равным 0,08 Ом/км, а активное согласно данным таблицы А.3 и рисунку А.1:

Заданными точками расчета являются точки:

КЗ1 – на секции шин 6-10 кВ;

КЗ2 – в конце КЛЭП под номером 2 перед трансформаторами 6-10 кВ;

КЗ3 – в конце КЛЭП перед выводами высоковольтного асинхронного электродвигателя под номером 4;

КЗ4 – в конце КЛЭП перед выводами высоковольтного синхронного электродвигателя под номером 5.

При составлении схемы замещения исходной схемы, изображенной на рисунке А.1 необходимо замещать представленные элементы системы электроснабжения следующими:

- двухобмоточный трансформатор – индуктивным сопротивлением;
- кабельная линия электропередач – активным и индуктивным сопротивлениями;
- систему – источником ЭДС и индуктивным сопротивлением;
- синхронный и асинхронный высоковольтные двигатели – источниками ЭДС и индуктивным сопротивлением.

Важно также помнить, что в расчетах токов КЗ участвуют элементы с номинальным напряжением выше 1 кВ и те сопротивления и источники ЭДС, которые входят в короткозамкнутый контур.

Б.2 Определение параметров элементов схемы замещения

Вначале необходимо принять базисную мощность равную $S_б=1000$ МВА. В качестве базисных напряжений первой ступени трансформации принимаем соответственно $U_{б1}=6,3$ (10,5) кВ.

Определим базисный ток:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б1}}$$

Определим параметры элементов схемы замещения:

1). Параметры энергосистемы:

$$X_c = S_б/S''_к;$$

$$E_c = 1;$$

2). Двухобмоточные трансформаторы под номерами 1 и 3:

$$X_{Ti} = U_k \cdot S_{\delta} / 100 \cdot S_{ном};$$

3). Кабельные линии электропередач:

$$X_{Li} = x_{уд} \cdot Li \cdot S_{\delta} / U_{\delta I}^2;$$

$$R_{Li} = r_{уд} \cdot Li \cdot S_{\delta} / U_{\delta II}^2;$$

4). Асинхронный высоковольтный двигатель М1-М9:

$$X_{Mi} = (1/K_{пуск}) \cdot S_{\delta} / S_{ном} = (1/K_{пуск}) \cdot S_{\delta} \cdot \cos\varphi / P_{ном};$$

$$E_{Mi} = 1 - \sin\varphi / K_{пуск};$$

5). Синхронный двигатель MS1-MS9:

$$X_{MSi} = x_d'' \cdot S_{\delta} / S_{ном} = x_d'' \cdot S_{\delta} \cdot \cos\varphi / P_{ном};$$

$$E_{MSi} = 1 + x_d'' \cdot \sin\varphi;$$

Б.3 Преобразование схемы замещения к точкам коротких замыканий

Если некоторые сопротивления после составления схемы замещения не входят в короткозамкнутую цепь, то в дальнейшем преобразовании схемы их учитывать не следует.

После этого можно сложить сопротивления расположенные последовательно.

Если некоторые сопротивления не удастся сложить, тогда для них необходимо применить более сложную методику преобразования.

Например, имеется частично упрощенная схема замещения, представленная на рисунке Б.1, необходимо привести ее к точке КЗ под номером 1.

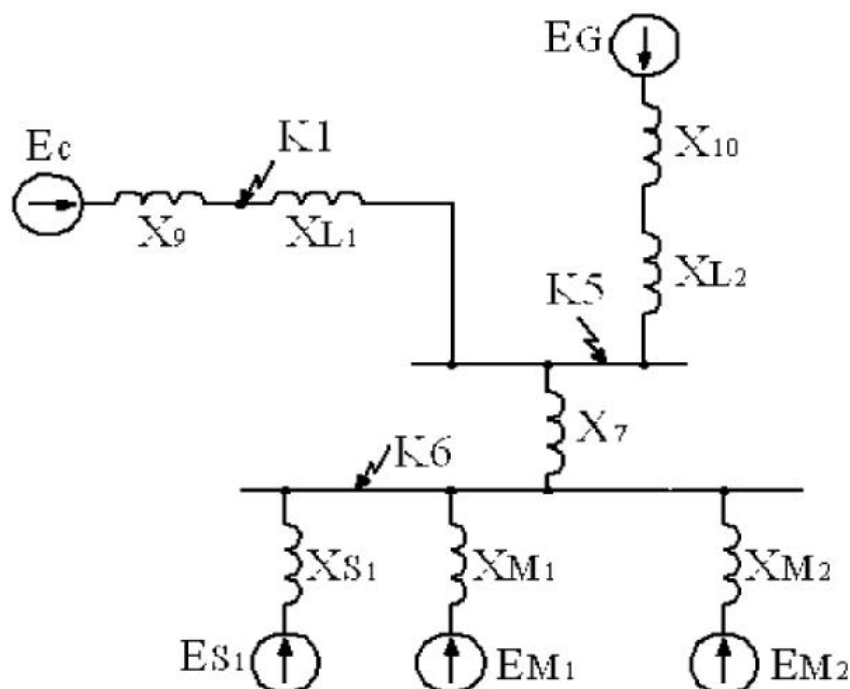


Рисунок Б.1– Исходная схема замещения

Для начала сложим сопротивления расположенные последовательно:

$$X_{11} = X_{10} + X_{L2};$$

Для сопротивления X_7 применим метод коэффициентов распределения.

Определим сначала эквивалентное сопротивление:

$$X_{\text{Э}} = 1/(1/X_{S1} + 1/X_{M1} + 1/X_{M2});$$

Найдем результирующее сопротивление:

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{Э}} + X_7;$$

Вычислим коэффициенты распределения:

$$C_1 = X_{\text{Э}}/X_{S1};$$

$$C_2 = X_{\text{Э}}/X_{M1};$$

$$C_3 = X_{\text{Э}}/X_{M2}.$$

Находим искомые преобразованные сопротивления:

$$X_{12} = X_{\text{рез}}/C_1;$$

$$X_{13} = X_{\text{рез}}/C_2;$$

$$X_{14} = X_{\text{рез}}/C_3.$$

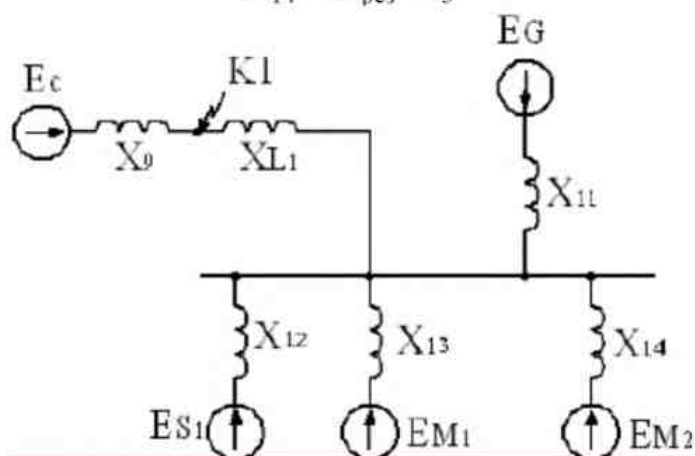


Рисунок Б.2 – Частично преобразованная эквивалентная схема замещения

Для сопротивления X_{L1} применим метод коэффициентов распределения:

Определим эквивалентное сопротивление:

$$X_{\text{Э}} = 1/(1/X_{11} + 1/X_{12} + 1/X_{13} + 1/X_{14});$$

Найдем результирующее сопротивление:

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{Э}} + X_{L1};$$

Вычислим коэффициенты распределения:

$$C_1 = X_{\text{Э}}/X_{11};$$

$$C_2 = X_{\text{Э}}/X_{12};$$

$$C_3 = X_{\text{Э}}/X_{13};$$

$$C_4 = X_{\text{Э}}/X_{14};$$

Находим искомые преобразованные сопротивления:

$$X_{15} = X_{\text{рез}}/C_1;$$

$$X_{16} = X_{\text{рез}}/C_2;$$

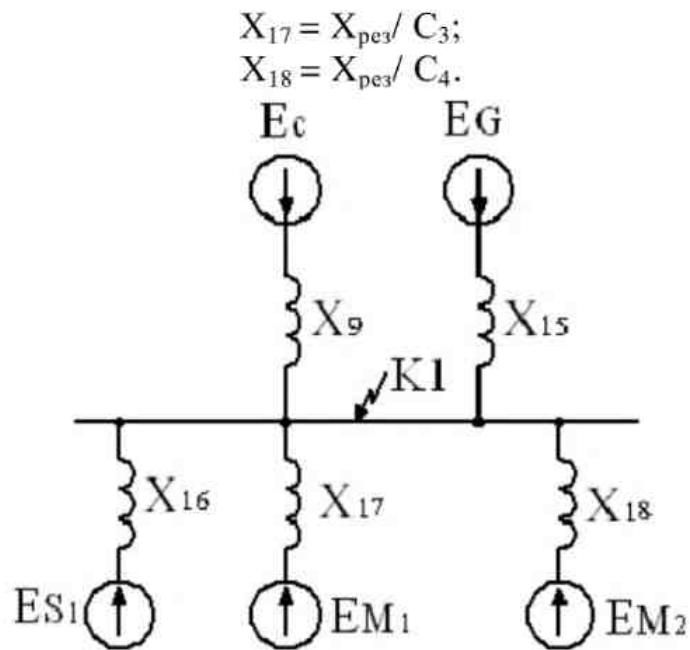


Рисунок Б.3 – Схема замещения, приведенная к точке К1

Б.4 Расчет токов короткого замыкания

Расчет трехфазного тока КЗ для каждой отдельной генерирующей ветви необходимо производить по формуле:

$$I_{\text{КЗ}i}^{(3)} = E_i \cdot I_{\text{б}i} / X_i;$$

Рассчитаем все значения данных величин для точек КЗ1-КЗ4 и представим получившиеся значения в виде таблицы Б.1:

Точка КЗ	Ветвь, питающая точку КЗ	$I_{\text{КЗ}i}^{(3)}, \text{ A}$
КЗ1	С	
	Мi	
	MSi	
	Σ	
КЗi	С	
	Мi	
	MSi	
	Σ	

Приложение В (справочное)

Расчет режима самозапуска

В.1 Принимаемые допущения

При использовании методики приближенного определения токов самозапуска /9/ принимаются следующие допущения:

а) электродвигатели перед началом самозапуска полностью заторможены;

б) активное сопротивление элементов схемы замещения в расчетах не учитывается;

в) нагрузка делится на три условные категории:

1) бытовая нагрузка, имеющая в своем составе малую долю электродвигателей, коэффициент самозапуска для которой по опытным данным принимается $k_{СЗП} \approx 1,2 \div 1,3$;

2) обобщенная нагрузка, имеющая в своем составе более 50 % электродвигателей 0,4 кВ, участвующих в самозапуске, но практически не имеющая в своем составе электродвигателей напряжением 6–10 кВ;

3) электродвигатели 6–10 кВ, одновременно участвующие в самозапуске, каждый из которых учитывается в расчете индивидуальными параметрами.

Ток самозапуска приближенно рассчитывается как ток трехфазного КЗ за эквивалентным сопротивлением заторможенной нагрузки в режиме ее самозапуска, считая напряжение источника питания равным среднему.

В данном курсовом проекте рассматривается смешанная нагрузка (обобщенная нагрузка при наличии электродвигателей 6–10 кВ).

В.2 Порядок расчета

Рассмотрим порядок расчета тока самозапуска для схемы электроснабжения, представленной на рисунке В.1.

В.2.1 Определяется сопротивление обобщенной нагрузки.

Сопротивление обобщенной нагрузки $x_{НАГР}$, отнесенное к рабочей максимальной (как правило, номинальной) мощности и среднему напряжению защищаемого элемента, в расчетах принимается равным: $x_{НАГР} = 0,35$. Это сопротивление включает в себя сопротивления понижающих трансформаторов 6–10/0,4 кВ, кабелей 0,4 и 6–10 кВ, затормозившихся электродвигателей и прочей нагрузки 0,4 кВ.

Сопротивлению $x_{НАГР}$ соответствует кратность пускового тока обобщенной нагрузки $k_{П} = 1/x_{НАГР} = 1/0,35 \approx 2,9$.

Сопротивление нагрузки линии 2 с учетом сопротивления линии 2, x_2' , Ом, определяется по формуле

$$x_2' = x_{Н,2} + x_2, \quad (B.3)$$

где $x_2 = X_0 \cdot l$, Ом (таблица А.3).

Сопротивление нагрузки силового трансформатора 3 $x_{Н,3}$, Ом, определяется по формуле

$$x_{Н,3} = x_{*НАГР} \cdot U_{НОМ,Т}^2 \cdot 10^3 / (S_{НОМ,Т}), \quad (B.4)$$

где $S_{НОМ,Т}$ – номинальная мощность силового трансформатора, кВ·А.

Сопротивление нагрузки трансформатора 3 с учетом сопротивления линии, $x_{Н,3}'$, Ом, определяется аналогично (B.3).

Эквивалентное сопротивление обобщенной нагрузки $x_{ОН}$, Ом, определяется по выражению

$$x_{ОН} = \frac{x_{Н,2}' \cdot x_{Н,3}'}{x_{Н,2}' + x_{Н,3}'}. \quad (B.5)$$

В.2.2 Определяется эквивалентное сопротивление электродвигателей. Сопротивление полностью остановившегося электродвигателя 4 $x_{ЭД,4}$, Ом, определяется по формуле (обозначения – см. таблицу А.5)

$$x_{ЭД,4} = U_{НОМ,ЭД} / (\sqrt{3} k_{П} I_{НОМ,ЭД}). \quad (B.6)$$

Сопротивление электродвигателя 4 с учетом сопротивления линии, $x_{ЭД,4}'$, Ом, определяется аналогично (B.3).

Сопротивление электродвигателя 5, с учетом сопротивления линии, $x_{ЭД,5}'$, Ом, определяется аналогично сопротивлению $x_{ЭД,4}'$.

Эквивалентное сопротивление электродвигателей 6–10 кВ $x_{ЭД}$, Ом, определяется по выражению

$$x_{ЭД} = \frac{x_{ЭД,4}' \cdot x_{ЭД,5}'}{x_{ЭД,4}' + x_{ЭД,5}'}. \quad (B.7)$$

В.2.3 Определяется эквивалентное сопротивление смешанной нагрузки $x_{Э,Н}$, Ом, по формуле

$$x_{Э,Н} = \frac{x_{ОН} \cdot x_{ЭД}}{x_{ОН} + x_{ЭД}}. \quad (B.8)$$

В.2.4 Определяется эквивалентное сопротивление цепи самозапуска $x_{Э}$, Ом, по формуле

$$x_{Э} = x_C + x_1 + x_{Э,Н}, \quad (B.9)$$

где x_C – сопротивление системы, приведенное к ступени 6–10 кВ, Ом;
 x_1 – сопротивление трансформатора ГПП, приведенное к ступени
 6–10 кВ, Ом.

$$x_C = U_C^2 / S_K'' \quad (B.10)$$

где S_K'' – мощность КЗ на шинах энергосистемы, МВ·А (таблица А.1).

$$x_1 = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{НОМ,Т,ГПП}^2}{S_{НОМ,Т,ГПП}} \quad (B.11)$$

где u_K – напряжение короткого замыкания трансформатора ГПП, %
 (таблица А.2);

$S_{НОМ,Т,ГПП}$ – мощность трансформатора ГПП, МВ·А (таблица А.2).

В.2.5 Определяется ток самозапуска I секции шин РУ 6–10 кВ ГПП $I_{СЗП}$, А, по формуле

$$I_{СЗП} = U_C / (\sqrt{3} \cdot x_{Э}). \quad (B.12)$$

В.2.6 Определяется коэффициент самозапуска $k_{СЗП}$ по формуле

$$k_{СЗП} = I_{СЗП} / I_{РАБ,МАХ}. \quad (B.13)$$

В.2.6 Производится расчет величины минимального остаточного напряжения на шинах РУ 6–10 кВ ГПП $U_{ОСТ}$, кВ, по формуле

$$U_{ОСТ} = \sqrt{3} I_{СЗП} \cdot x_{Э,Н}. \quad (B.14)$$

В.2.7 Определяется ток самозапуска I секции шин РУ 6–10 кВ ГПП $I_{СЗП,СУМ}$, А, с учетом нагрузки секции II, не терявшей питания, по формуле

$$I_{СЗП,СУМ} = U_C / (\sqrt{3} x_{Э,СУМ}), \quad (B.15)$$

где $x_{Э,СУМ}$ – эквивалентное сопротивление нагрузок секций I и II, Ом.

$$x_{Э,СУМ} = \frac{x_{Э,Н} \cdot x_{II}}{x_{Э,Н} + x_{II}}, \quad (B.16)$$

где x_{II} – сопротивление нагрузки секции II, не терявшей питание,
 уменьшенное в 2,5 раза, Ом.

$$x_{II} = U_{НОМ,Т,ГПП}^2 / (0,7 S_{НОМ,Т,ГПП} \cdot 2,5). \quad (B.17)$$