

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Электроэнергетика и Электротехника»

**Исследование максимальной токовой защиты и токовой
отсечки
ЛЭП с односторонним питанием**

Лабораторный практикум по РЗ и А систем электроснабжения

Набережные Челны
2015

УДК 621.311.075.8

ББК 31.19. я 73

С18

Печатается по решению учебно-методической
комиссии отделения энергетики и информатизации
Набережночелнинского института КФУ

Рецензент: канд. техн. наук Л.А. Галиуллин

Санакулов А.Х.

С18 Исследование максимальной токовой защиты и токовой отсечки ЛЭП с односторонним питанием: лабораторный практикум по РЗ и А систем электроснабжения / А.Х. Санакулов – Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского ин-та К(П)ФУ, 2015. – 40 с. : ил. – 24. Библиогр.: 3 назв.

В пособии приведены основные теоретические положения, описание лабораторного стенда, схемы исследований МТЗ и ТО ЛЭП с односторонним питанием. порядок выполнения и оформления лабораторных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также может быть использовано для повышения квалификации эксплуатационного персонала электроэнергетических систем.

УДК 621.311.075.8

ББК 31.19. я 73

© Санакулов А.Х., 2015

© Набережночелнинский институт К(П)ФУ, 2015

Лабораторная работа

Исследование максимальной токовой защиты и токовой отсечки ЛЭП с односторонним питанием

I. Цель работы

1. Изучение устройства, принципа действия и схем максимальной токовой защиты (МТЗ) и токовой отсечки (ТО).
2. Исследование МТЗ и ТО двух линий электропередачи с односторонним питанием.

II. Основные теоретические положения

II.1. Общие сведения

Одним из признаков возникновения короткого замыкания является увеличение тока в линии. Этот признак используется для выполнения защит, называемых токовыми. Токовые защиты приходят в действие при увеличении тока в фазах линии сверх определенного значения.

Токовые защиты подразделяются на максимальные токовые защиты (МТЗ) и токовые отсечки. Главное различие между этими защитами заключается в способе обеспечения селективности.

Селективность действия максимальных токовых защит достигается с помощью выдержки времени.

В сетях с односторонним питанием максимальная защита должна устанавливаться в начале каждой линии со стороны источника питания. Тогда каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее подстанции.

При коротком замыкании (КЗ) в какой-либо точке ток КЗ проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания и местом повреждения, в результате чего

приходят в действие все защиты. Однако по условию селективности срабатывает на отключение только защита, установленная на поврежденной линии. Для обеспечения указанной селективности максимальные защиты выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания.

Токовая защита может быть с зависимой, независимой или ограниченно зависимой выдержкой времени.

Селективность действия токовых отсечек обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты при КЗ и улучшения ее отстройки от токов нагрузки применяется блокировка посредством реле минимального напряжения. Защита может действовать на отключение только при условии понижения напряжения в сети ниже минимального уровня рабочего напряжения. В случае перегрузки линии и относительно небольшом понижении напряжения защита не сработает, даже если ток фаз увеличится выше значения уставки.

II.2. Максимальная токовая защита

II.2.1. Принцип действия МТЗ

Максимальные токовые защиты являются основными защитами для сетей с односторонним питанием. Их устанавливают в начале каждой линии со стороны источника питания.

Максимальная токовая защита получила широкое распространение в радиальных сетях напряжением до 35кВ. Защита надежная, так как проста по исполнению и в эксплуатации. Селективность защиты обеспечивается только в радиальной сети с одним источником питания.

Защита не быстродействующая, причем наибольшую выдержку времени имеют защиты головных участков сети, для

которых быстрое отключение участка, где произошло КЗ, особенно важно с точки зрения надежности снабжения потребителей электроэнергией.

В отдельных случаях при значительном уменьшении мощности источника питания в минимальных эксплуатационных режимах чувствительность защиты может оказаться недостаточной, особенно при КЗ на соседних участках сети, когда рассматриваемая защита должна действовать как резервная.

В радиальной сети с односторонним питанием защита устанавливается на каждой линии. Защита наиболее удаленной от источника питания линии имеет наименьший ток срабатывания и наименьшую выдержку времени. Защита каждой последующей линии имеет выдержку времени бóльшую, чем у предыдущей защиты.

При КЗ, например, в точке $K1$ (рис. 1, *a*), ток КЗ проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания G и местом повреждения, в результате чего приходят в действие все защиты 1...4. Однако по условию селективности сработать на отключение должна только защита 4, установленная на поврежденной линии. Для обеспечения указанной селективности максимальные защиты выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителя M к источнику питания, как это показано на рис. 1, *б*. При соблюдении этого принципа в случае КЗ в точке $K1$ сети раньше других сработает защита 4 и произведет отключение поврежденной линии. Защиты 1, 2 и 3 вернуться в начальное положение, не успев подействовать на отключение.

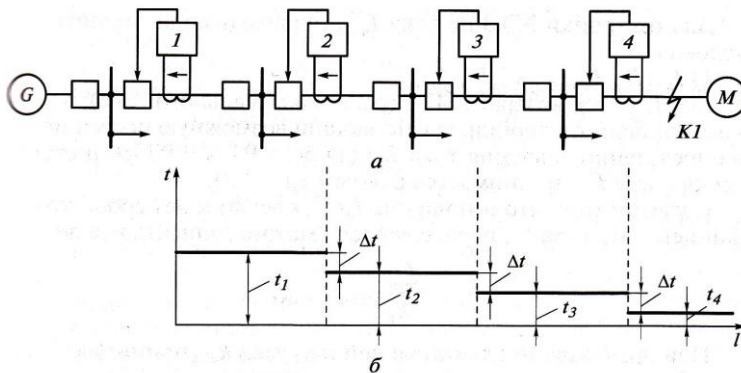


Рис. 1. Максимальные токовые защиты в радиальной сети с односторонним питанием: а – размещение защит 1...4; б – выдержки времени защит, выбранные по ступенчатому принципу

Рассмотренный принцип выдержек времени называется *ступенчатым*.

Максимальные токовые защиты выполняются по трех- и двухфазным схемам. По способу питания оперативных цепей МТЗ косвенного действия подразделяются на МТЗ на постоянном и переменном оперативном токе. По характеру зависимости времени действия от тока различают МТЗ с зависимой и независимой характеристиками.

Параметрами срабатывания МТЗ являются ток $I_{с.з.}$ и время $t_{с.з.}$ срабатывания защиты.

II.2.2. Выбор тока срабатывания и выдержки времени МТЗ

Выбор тока срабатывания

МТЗ должна надежно работать при повреждениях на защищаемом участке, но в то же время она не должна действовать при максимальном рабочем токе нагрузки $I_{н \max}$ и

кратковременных перегрузках, вызванных пуском и самозапуском электродвигателей. Суммарный ток во время самозапуска может превосходить суммарный максимальный рабочий ток нагрузки установившегося режима $I_{p \max}$.

Увеличение тока нагрузки из-за самозапуска электродвигателей оценивают коэффициентом самозапуска $k_{сзп}$, показывающим, во сколько раз возрастает ток $I_{p \max}$.

Для отстройки МТЗ по току $I_{H \max}$ необходимо выполнить два условия:

$$1) \quad I_B \geq k_{отс} I_{H \max} = k_{отс} k_{сзп} I_{p \max} ,$$

где I_B – ток возврата МТЗ (реле максимального тока); $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий возможную погрешность в определении значения тока I_B (для реле РТ-40, РТ-80 и статистических реле $k_{отс}$ принимается равным 1,1 ... 1,2).

С учетом того, что отношение $I_B / I_{с.з.}$ представляет собой коэффициент возврата k_B , первое условие можно записать в виде

$$I_{с.з.} \geq \frac{k_{отс}}{k_B} k_{сзп} I_{p \max} . \quad (1)$$

При преобладании двигательной нагрузки $k_{сзп}$ принимают равным 3 ... 6; при малой двигательной нагрузке – 1,5 ... 2,0;

$$2) \quad I_{с.з.} \geq I_{H \max} .$$

Наибольшее значение $I_{H \max}$ имеет обычно в следующих послеаварийных режимах:

- при отключении одной из параллельных линий (нагрузка на оставшейся удваивается);
- при успешном включении (под действием АПВ или вручную) отключавшейся из-за повреждения линии с подключенной к ней нагрузкой;

- при подключении к находящейся в работе линии под действием АВР дополнительной нагрузки. При включении секционного выключателя устройством АВР необходимо учитывать увеличение мощности на первую линию при отключении линии, и наоборот.

Ток срабатывания реле $I_{ср.}$ определяется с учетом коэффициента трансформации трансформаторов тока $k_{ТТ}$ и схемы включения реле:

$$I_{ср} = k_{сх} \frac{I_{с.з.}}{k_{ТТ}}, \quad (2)$$

где $k_{сх}$ – коэффициент схемы, равный отношению тока, проходящего в токовом реле защиты при симметричном режиме работы линии, к вторичному току ТТ защиты.

Для схемы соединения в «звезду» (полную или неполную)

$k_{сх} = 1$, для схемы с включением реле на разность токов двух фаз $k_{сх} = \sqrt{3}$.

Как видно из выражения (2), значение $I_{с.з.}$ зависит от $k_{в}$ и

$I_{р \max}$. Ток срабатывания обратно пропорционален $k_{в}$, поэтому для уменьшения $I_{с.з.}$ стремятся применять токовые реле с высоким коэффициентом возврата (примерно 0,85 и выше).

Существенное значение для надежной отстройки защиты по току нагрузки имеет правильная оценка величины $I_{н \max}$. Определяя максимальное значение тока нагрузки, нужно учитывать реально возможное увеличение тока нагрузки, обычно возникающее в результате нарушения нормальной схемы сети.

Таким образом, ток срабатывания максимальной токовой защиты, т.е. минимальный ток в фазах линии, при котором защита срабатывает, выбирается больше максимального рабочего тока защищаемой линии с учетом необходимости возврата защиты после отключения участка, где произошло КЗ, защитой данного участка.

Ток срабатывания, выбранный исходя из условия отстройки по току нагрузки, проверяют по условию чувствительности

защиты. Проверку ведут по минимальному значению тока $I_{k \min}$ при повреждении в конце защищаемой зоны. Зона действия максимальной токовой защиты должна охватывать защищаемую линию и обеспечивать резервирование защиты следующего участка. Чувствительность МТЗ оценивается коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}}$.

Для защищаемой линии считается допустимым $k_{\text{ч}} \geq 1,5$; при КЗ на резервируемом участке допускается $k_{\text{ч}} \geq 1,2$.

Как правило, расчетным по чувствительности видом КЗ для защиты от междуфазных повреждений является двухфазное КЗ.

Выбор выдержки времени

Выдержку времени МТЗ для обеспечения селективности выбирают по ступенчатому принципу (см. рис. 1, б).

Разницу между временем действия МТЗ двух смежных участков называют *ступенью селективности* Δt . Если выдержка времени предыдущего участка равна t_1 , то выдержка времени последующего участка (в направлении к источнику питания) должна быть $t_2 = t_1 + \Delta t$. С учетом погрешности срабатывания реле времени $t_2 = t_1 + \Delta t + t_{\text{зап}}$, где $t_{\text{зап}}$ – время запаса.

Для применяемых в эксплуатации реле и выключателей ступень селективности МТЗ с независимой характеристикой (выдержкой времени) колеблется в пределах 0,2 ... 0,6 с, а при МТЗ с зависимой характеристикой – 0,6 ... 1,0 с. Чаще всего ступень селективности принимают равной 0,5 с.

II.2.3. Схемы МТЗ

На рис. 2, а показана принципиальная схема двухфазной двухрелейной максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени. Защиту, выполненную по этой схеме, широко используют в сетях с изолированной нейтралью, а также с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (ДГР).

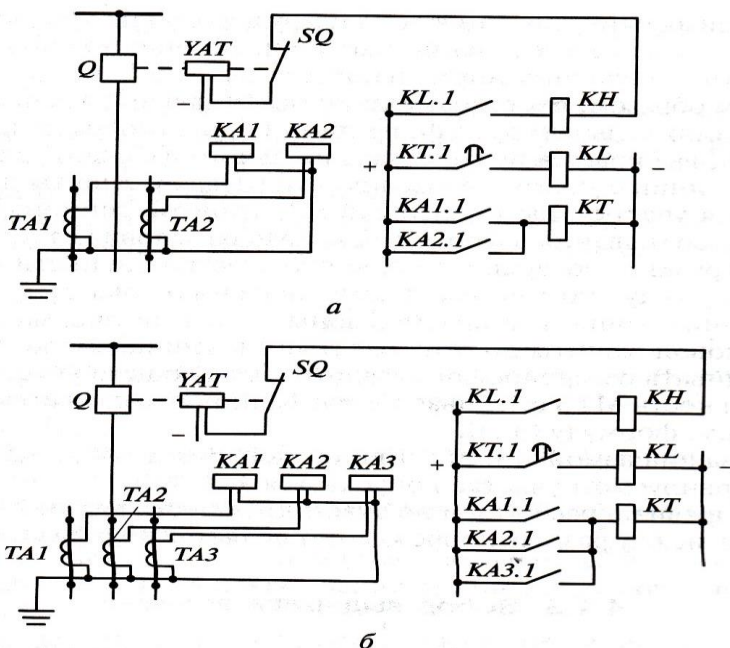


Рис. 2. Принципиальные схемы двухфазной двухрелейной (а) и трехфазной трехрелейной (б) максимальных токовых защит с независимой выдержкой времени

На рис. 2,б представлена трехфазная трехрелейная схема. Защита, выполненная по этой схеме, действует при всех видах КЗ между фазами и замыкании одной или двух фаз на землю. Ее применяют также в сетях с глухозаземленной нейтралью.

На рис. 3 показана схема трехфазной трехрелейной МТЗ с зависимой выдержкой времени. Трехфазные схемы дороже двухфазных из-за большего количества оборудования и соединительных проводов. Кроме того, в большинстве случаев, трехфазные защиты по сравнению с двухфазными работают не избирательно при двойных замыканиях на землю.

Для повышения чувствительности МТЗ дополняется блокировкой (пуском) по напряжению, благодаря чему защита

действует только при КЗ и не действует в режиме максимальной нагрузки и при самозапуске электродвигателей. Измерительный орган напряжения (ИОН) такой защиты выполняется с помощью реле минимального напряжения и действует совместно с токовым реле измерительного органа тока (ИОТ).

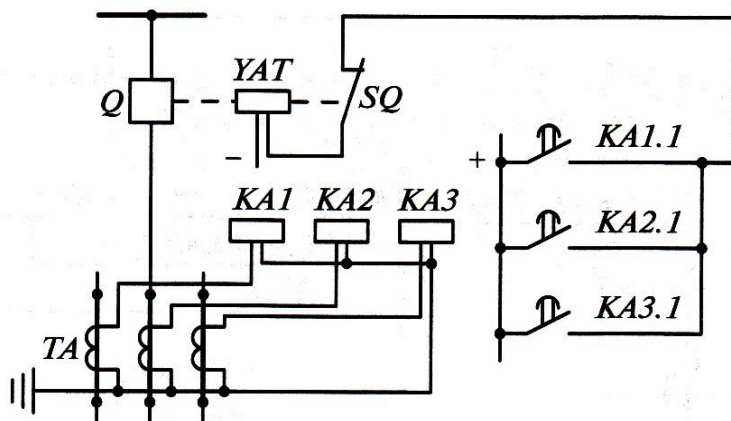


Рис. 3. Принципиальная схема трехфазной трехрелейной максимальной токовой защиты с зависимой выдержкой времени

При КЗ, когда возрастает ток и резко уменьшается напряжение, срабатывают оба измерительных органа (ОИН и ИОТ) и с заданной выдержкой времени МТЗ действует на отключение линии.

При перегрузке, когда возрастает ток, а напряжение изменяется незначительно, приходят в действие только токовые реле, ИОН блокирует МТЗ, так как реле напряжения не действуют. Несрабатывание ИОН при перегрузке обеспечивается выбором соответствующей уставки срабатывания реле минимального напряжения. Уставка должна быть такой, чтобы реле не срабатывало при минимальном

рабочем напряжении $U_{p \min}$. Поэтому токовое реле отстраивают не по $I_{н \max}$, а по току нагрузки нормального режима $I_{p.норм}$:

$$I_{с.з.} = \frac{k_{отс}}{k_B} I_{p.норм} \cdot \quad (3)$$

Сравнение выражений (1) и (3) позволяет сделать вывод, что чувствительность МТЗ с блокировкой по напряжению выше чувствительности МТЗ без блокировки по напряжению.

Уставку срабатывания ИОН определяют по формуле

$$U_{с.з.} = \frac{U_{p.min}}{k_{отс} k_B}$$

При этом напряжение срабатывания реле напряжения

$$U_{с.р.} = \frac{U_{p.min}}{k_{отс} k_B k_{ТН}}$$

где $U_{p \min}$ – остаточное напряжение при самозапуске двигателей; $k_{отс} = 1,1 \dots 1,2$; $k_B = 1,1 \dots 1,25$; $k_{ТН}$ – коэффициент трансформации ТН.

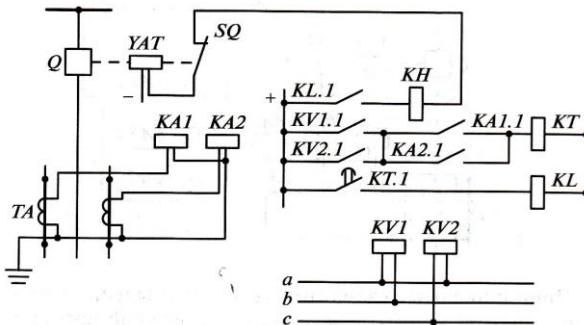


Рис. 4. Принципиальная схема двухфазной максимальной токовой защиты с блокировкой по минимальному напряжению

Чувствительность ИОН при КЗ определяется коэффициентом $k_{\text{ч}} = U_{\text{с.з.}}/U_{\text{к макс}}$ где $U_{\text{к макс}}$ – максимальное значение остаточного напряжения при КЗ в конце резервируемого участка МТЗ. При этом допустим $k_{\text{ч}} \geq 1,2$.

На рис. 4 показана принципиальная схема двухфазной МТЗ с блокировкой по напряжению с помощью реле минимального напряжения. Применение этой схемы объясняется тем, что в некоторых случаях выбор тока срабатывания МТЗ линии больше, чем $I_{\text{р макс}}$, приводит к сильному заглублению защиты, т.е. срабатыванию защиты при большем токе. Максимальную токовую защиту с блокировкой с помощью реле минимального напряжения применяют на коротких линиях и линиях средней длины, так как на длинных линиях она оказывается недостаточно чувствительной.

II.2.4. Согласование защит по чувствительности

Принцип согласования защит по чувствительности требует, чтобы защита, расположенная ближе к источнику питания, была менее чувствительна, чем защита, расположенная дальше от источника питания. При согласовании защит по чувствительности учитывают тот факт, что токи нагрузки и токи КЗ в удаленных точках складываются алгебраически. Поэтому условие согласования по чувствительности для последующей МТЗ представляют в виде

$$I_{\text{с.з.}} \geq \frac{k_{\text{н.с.}}}{k_{\text{р}}} \left[(nI_{\text{с.з. пред.}})_{\text{max}} + \sum_1^{N-n} I_{\text{р макс}}(N - n) \right],$$

где $k_{\text{н.с.}}$ — коэффициент надежности согласования, величина которого зависит от точности работы реле и ТТ, точности настройки реле и т.п. (берется по табл. 1); $k_{\text{р}}$ — коэффициент токораспределения, учитываемый при наличии нескольких источников питания (при одном источнике питания $k_{\text{р}} = 1$);

$(nI_{с.з. пред.})_{max}$ — наибольшее из произведений числа n параллельно работающих элементов (предыдущих) и тока срабатывания их защит; $\sum_1^{N-n} I_{p max}$ — геометрическая сумма максимальных рабочих токов всех предыдущих элементов подстанции за исключением тех, с защитами которых производят согласование; при однородной нагрузке допустимо арифметическое сложение токов нагрузки.

Таблица 1

Рекомендуемые значения $k_{н.с}$ для расчета максимальных токовых защит линий

Тип реле	Значение $k_{н.с}$ при напряжении линий, кВ	
	110 и выше	6, 10, 20, 35
РТ-40	1,1 ... 1,2	1,25
РТ-80, РТ-90	—	1,3 ... 1,4
РТВ	—	1,5

Наибольшие трудности вызывает согласование между собой МТЗ с разными характеристиками, МТЗ с предохранителями, а также согласование защитных устройств в сетях с параллельно работающими элементами и трансформаторами, имеющими большие диапазоны регулирования напряжения.

II.3. Токовая отсечка

II.3.1. Принцип действия ТО

Основной недостаток максимальной токовой защиты заключается в наличии относительно большой выдержки времени. Поэтому максимальную токовую защиту используют, если это возможно, совместно с быстродействующей токовой защитой — токовой отсечкой.

Токовая отсечка является разновидностью МТЗ, обеспечивающей быстрое отключение участка, где произошло КЗ. Различают ТО мгновенного действия и ТО с выдержкой времени.

Токовая отсечка может применяться в электрической сети любой конфигурации с любым числом источников питания.

Токовая отсечка — быстродействующая и надежная защита. Основным достоинством ТО является быстрое устранение КЗ, возникающих вблизи источника питания, т. е. предотвращение повреждений, сопровождаемых большими токами КЗ.

Основной недостаток ТО заключается в том, что в общем случае она защищает только часть линии, поэтому не может быть основной защитой линии.

При совместном использовании МТЗ и ТО обеспечивается надежная защита линии на всем ее протяжении.

Сочетание ТО и МТЗ называется токовой защитой со ступенчатой характеристикой выдержки времени. Такая защита может быть двух- или трехступенчатой. В двухступенчатой защите в качестве первой ступени используется ТО, а в качестве второй — МТЗ. В трехступенчатой защите второй ступенью служит ТО с выдержкой времени, а третьей ступенью — МТЗ. Назначением второй ступени защиты является отключение поврежденной линии при возникновении КЗ вне зоны действия первой ступени, то есть в конце линии. Третья ступень резервирует действие защит смежного участка сети.

Токовая отсечка является разновидностью МТЗ, обеспечивающей быстрое отключение участка, где произошло КЗ. Различают ТО мгновенного действия и ТО с выдержкой времени.

Селективность ТО обеспечивается соответствующим выбором токов ее срабатывания. ТО не должна работать при КЗ за пределами своей зоны действия, а также на смежных участках сети, защита которых имеет выдержку времени, равную или большую, чем выдержка времени отсечки. Поэтому ток срабатывания отсечки $I_{с.з.}$ должен быть больше максимального тока КЗ, проходящего через токовое реле отсечки при повреждении в конце участка (например, участка АМ на рис. 2.5), за пределами которого она не должна работать: $I_{с.з.} > I_{КМ}$.

Такой способ ограничения зоны действия основан на том, что ток КЗ I_K зависит от расстояния между источником и местом повреждения (см. график на рис. 5).

Известно, что ток КЗ в какой-либо точке рассматриваемого участка линии

$$I_K = \frac{E_C}{X_{эс} + X_{Л.К.}} = \frac{E_C}{X_{эс} + x_L l_K}, \quad (4)$$

где E_C — эквивалентная ЭДС генераторов энергосистемы; $X_{эс}$, $X_{Л.К.}$ — сопротивления энергосистемы и участка линии до точки КЗ (активная составляющая сопротивления для простоты не учитывается); x_L — удельное сопротивление линии, Ом/км; l_K — длина защищаемой линии от ее начала до точки КЗ.

Из выражения (4) следует, что при удалении точки КЗ от источника питания (или от места расположения защиты) сопротивление $X_{Л.К.}$ растет ($X_{Л.К.} \sim l_K$), а ток КЗ соответственно уменьшается, как показано на рис. 5.

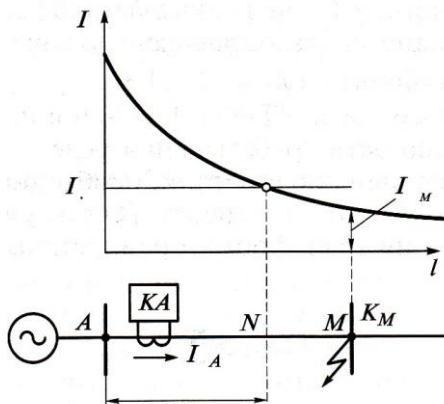


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип действия токовой отсечки

Зона действия мгновенной ТО по условиям селективности не должна выходить за пределы защищаемой линии. Зона действия ТО, работающей с выдержкой времени, выходит за пределы защищаемой линии, и по условию селективности ее надо отстраивать от конца зоны защиты смежного участка по току и по времени.

Токовые отсечки применяются как в радиальной сети с односторонним питанием, так и в сети, имеющей двустороннее питание.

Для обеспечения расчетной зоны действия отсечки трансформаторы тока, питающие ее цепи, должны работать при токе срабатывания отсечки (т.е. при $I_p = I_{c3}$) с погрешностью не более 10 %.

II.3.2. Мгновенные ТО на линиях с односторонним питанием

Ток срабатывания мгновенной ТО при КЗ в конце защищаемой линии, т.е. в точке M (см. рис. 5),

$$I_{c3} = k_{отс} I_{KM max} \quad (5)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки; $I_{KM max}$ — максимальный ток КЗ в фазе линии при КЗ на шинах подстанции (в точке M на рис. 5).

Ток КЗ $I_{KM max}$ рассчитывается для режимов и повреждений, при которых он является наибольшим. Поскольку собственное время действия ТО составляет 0,01... 0,02 с, ток КЗ рассчитывается для момента времени $t = 0$ и принимается равным действующему значению периодической составляющей.

Если время действия ТО не превышает 0,02 с, то в этом случае учитывают апериодическую составляющую тока КЗ, т. е. умножают $I_{KM max}$ на коэффициент $k_a = 1,6... 1,8$.

Для ТО с токовыми реле РТ-40 и РТ-90 принимают $k_a = 1,5$ из-за большой погрешности срабатывания реле.

На линиях, питающих подстанции, необходимо не только выполнять условие (5), но и отстроить ТО по суммарному броску тока намагничивания трансформаторов, установленных на этих подстанциях, т. е.

$$I_{с.з.} \geq (3 \dots 5) \sum I_{т.ном}, \quad (6)$$

где $\sum I_{т.ном}$ — суммарный номинальный ток трансформаторов подстанции.

Окончательно ток срабатывания ТО принимают равным большему из значений, определенных по формулам (5) и (6).

Ток срабатывания реле определяют по формуле (2).

Зону действия ТО обычно находят графически, как показано на рис. 5, но можно также определить ее по формуле

$$x_{отс} \% = \frac{100}{X_{л}} \left(\frac{E_{с}}{I_{с.з.}} - X_{эс} \right),$$

где $x_{отс} \%$ — зона действия ТО, выраженная в процентах от сопротивления защищаемой линии; $X_{л}$ — сопротивление защищаемой линии; $I_{с.з.}$ — ток срабатывания ТО, выбранный по условиям (5) и (6); $X_{эс}$ — сопротивление энергосистемы.

В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуется применять ТО, если ее зона действия охватывает не менее 20 % защищаемой линии. В качестве резервной ее применяют и при меньшей зоне действия.

Время действия мгновенной ТО складывается из времени срабатывания токовых и промежуточного реле. При промежуточном реле с собственным временем действия 0,02 с отсечка срабатывает в течение времени $t_{с.з.} = 0,04 \dots 0,06$ с. Наличие промежуточного реле с таким временем действия позволяет не учитывать апериодическую составляющую тока КЗ, так как последняя затухает за 0,02...0,03 с.

Применение промежуточного реле с временем действия 0,06...0,08 с позволяет отстроить ТО по времени работы разрядников, которое составляет примерно 0,01 ...0,02 с.

Мгновенную ТО, которая действует за пределами своей линии, называют *неселективной*. Такие отсечки применяются для быстрого отключения всей защищаемой линии при КЗ в любой ее точке. Неселективное действие ТО при КЗ вне линии исправляется с помощью АПВ, включающего отключившуюся линию.

II.3.3. Мгновенные ТО на линиях с двусторонним питанием

На линии с двусторонним питанием мгновенная отсечка не должна действовать при КЗ за пределами защищаемой линии (в точках K_A и K_B на рис. 6). Исходя из этого ток срабатывания выбирают большим тока I_{KA} , проходящего от генератора A при КЗ на шинах B , и тока I_{KB} , проходящего от генератора B при КЗ на шинах A . Ток срабатывания определяют по формуле (5), в которую вместо $I_{KM \max}$ подставляют больший из токов: I_{KA} или I_{KB} .

Кроме того, ТО отстраивают по току качания генератора A относительно генератора B , т. е.

$$I_{с.з.} = k_{отс} I_{кач \max} , \quad (7)$$

где $k_{отс} = 1,2 \dots 1,3$.

Окончательно ток срабатывания принимают равным большему из значений, полученных по формулам (5) и (7).

На линиях с двусторонним питанием отсечки устанавливают с обеих сторон линии, причем у этих отсечек одинаковый ток срабатывания.

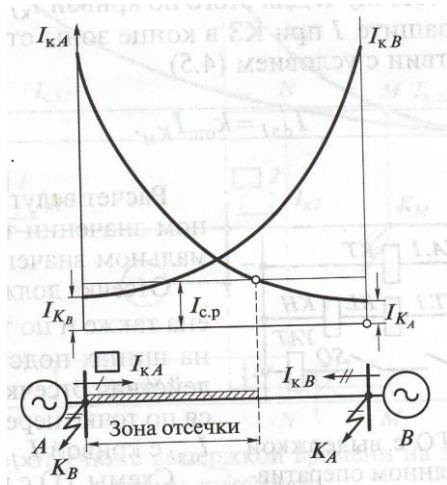


Рис. 6. Мгновенные отсечки на линии с двусторонним питанием

II.3.4. ТО с выдержкой времени

В связи с тем, что мгновенная ТО защищает только часть линии, для защиты всей линии с минимальным временем действия применяют ТО с выдержкой времени (рис. 7). Зону и время действия такой отсечки 1 (рис. 8) согласуют с зоной и временем действия мгновенной отсечки 2 для обеспечения селективности.

Условие согласования этих отсечек по времени

$$t_{31} = t_{32} + \Delta t$$

где t_{31} , t_{32} — время действия соответственно отсечек 1 и 2; Δt — ступень селективности.

В сети с односторонним питанием при КЗ в точке K ток, проходящий через защиты 1 и 2, одинаков, т. е. $I_{K1} = I_{K2} = I_K$. Поэтому условие согласования зон действия защит 1 и 2 имеет вид

$$I_{c.3.1} = k_{отс} I_{c.3.2}, \quad (8)$$

где $k_{отс} = 1,1 \dots 1,2$.

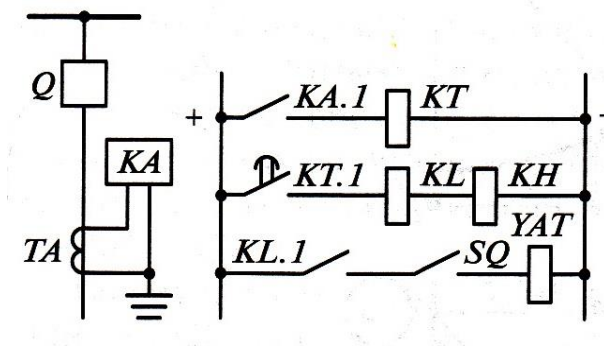


Рис. 7. Схема ТО с выдержкой времени на постоянном оперативном токе

Схемы ТО с выдержкой времени выполняются так же, как и схемы МТЗ с независимой выдержкой времени (см. рис. 2). Токовая отсечка с выдержкой времени охватывает полностью защищаемую линию и частично следующий участок.

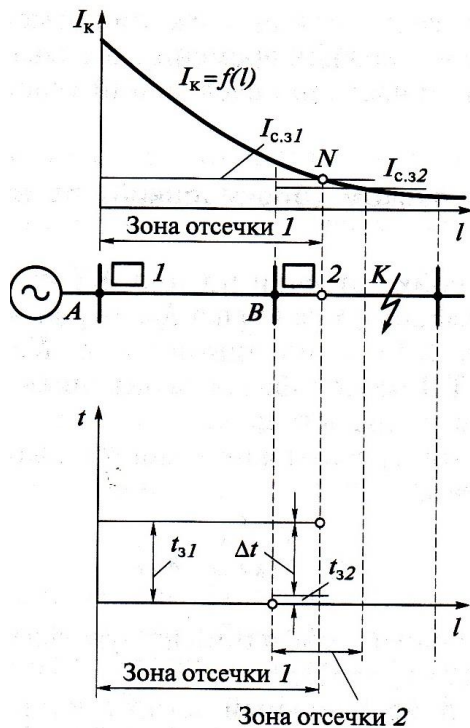


Рис. 8. Выбор $I_{c.z.}$ отсечки с выдержкой времени на линиях с односторонним питанием:

1 – ТО с выдержкой времени; 2 – мгновенная ТО

II.3.5. ТО с пуском (блокировкой) по напряжению

Если при отстройке отсечки по току КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора (точка $K1$ на рис. 9) чувствительность отсечки при КЗ в конце линии (точка $K2$) будет неприемлемо низкой, то ТО целесообразно дополнить пусковым минимальным органом напряжения.

В этом случае ток срабатывания защиты выбирают в соответствии с выражением

$$I_{с.з.} = I_{K2 \min} / k_{ч.т.}, \quad (9)$$

где $k_{ч.т.}$ — минимальный коэффициент чувствительности по току при КЗ в точке $K2$ ($k_{ч.т.} \geq 1,3$).

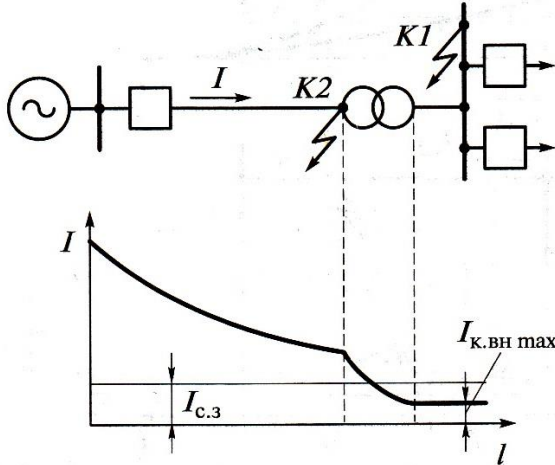


Рис. 9. Выбор тока срабатывания ТО тупиковой линии

Защита имеет измерительный орган тока, роль которого выполняют максимальные реле тока, и измерительный орган напряжения, в качестве которого используются минимальные реле напряжения. Измерительные органы подключают к защищаемой линии через ТТ и ТН. Отсечка сработает после того, как сработают оба измерительных органа, т. е. когда ток в линии превысит ток срабатывания защиты, а напряжение линии окажется ниже напряжения срабатывания защиты. ТО ложно не сработает при КЗ за трансформатором, так как ее действие блокируется (запрещается) с помощью реле минимального напряжения.

Напряжение срабатывания ТО с пуском от реле минимального напряжения выбирают по двум условиям:

1) отстройка по остаточному напряжению в месте установки защиты при КЗ за трансформатором при прохождении по линии тока, равного току срабатывания отсечки. В соответствии с этим условием напряжение срабатывания ТО определяют по формуле

$$U_{\text{с.з.}} = \frac{\sqrt{3}I_{\text{с.з.}}(Z_{\text{Л}}+Z_{\text{Т}})}{k_{\text{отс}}}, \quad (10)$$

где $Z_{\text{Л}}$, $Z_{\text{Т}}$ — полные сопротивления соответственно линии и трансформатора; $k_{\text{отс}} = 1,2$;

2) отстройка по минимальному рабочему напряжению линии. Исходя из этого условия

$$U_{\text{с.з.}} = U_{p \text{ min}}/k_{\text{отс}} \approx 0,7U_{\text{ном}}. \quad (11)$$

Окончательно напряжение срабатывания ТО принимают равным меньшему из значений, полученных по формулам (10) и (11).

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения

$$U_{\text{с.р.}} = U_{\text{с.з.}}/k_{\text{ТН}}$$

где $k_{\text{ТН}}$ — коэффициент трансформации ТН.

При перегорании предохранителей в цепи ТН, со вторичной стороны которого подключены минимальные реле напряжения, последние могут сработать. Ложное действие защиты в нормальном режиме работы линии предотвращается соблюдением второго условия выбора тока срабатывания защиты, который должен быть больше максимального рабочего тока линии

$$I_{\text{с.з.}} = k_{\text{отс}}I_{p \text{ max}}.$$

Защита имеет два измерительных органа (тока и напряжения), поэтому ее чувствительность должна быть обеспечена как по току, так и по напряжению.

Приемлемый коэффициент чувствительности по току находят из выражения (9). Коэффициент чувствительности по напряжению определяют по формуле

$$k_{\text{ч.н.}} = \frac{U_{\text{с.р.}}}{U_{2\text{max}}},$$

где $U_{2\text{max}}$ — наибольшее вторичное напряжение ТН при трехфазном КЗ в конце защищаемой линии в максимальном режиме.

Приемлемым является $k_{\text{ч.н.}} \geq 1,2$.

III. Описание лабораторного стенда

Общий вид лабораторного стенда по проведению базовых экспериментов представлен на рис. 10.

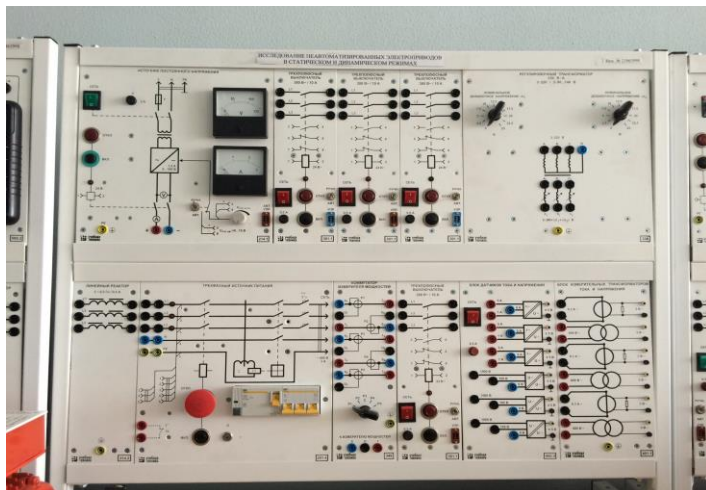


Рис. 10. Стенд для исследования МТЗ и ТО

Однолинейная схема электроснабжения для проведения экспериментов (рис. 11) по исследованию МТЗ и ТО включает две последовательно соединенные линии, подключенные к источнику G через трансформатор $T1$ и выключатели $Q1, Q2$. От шин ближней к источнику линии (первой) получает питание индуктивная нагрузка Q_L , от шин другой линии - активная нагрузка P . В начале первой линии установлены трансформаторы тока $TA1$ и напряжения $TV1$, в начале второй - только трансформатор тока $TA2$. Короткие замыкания $K1$ и $K2$ устраиваются в конце каждой из линий.

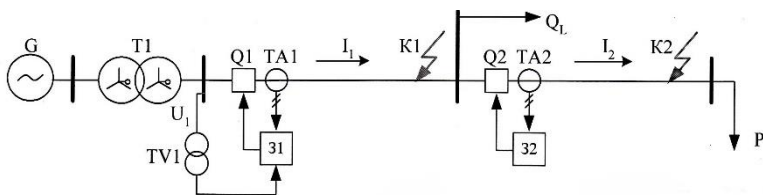


Рис. 11. Однолинейная схема сети электроснабжения

Две защиты 31 и 32 моделируются на компьютере с помощью специальной программы. Защита 31 может работать с независимой или зависимой выдержкой времени, а также с блокировкой по напряжению или без нее. Защита 32 может работать только с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению.

В рамках рассматриваемой работы можно смоделировать, как минимум, 5 различных вариантов (комбинаций) защит:

- 31 с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению;
- 31 с зависимой выдержкой времени без блокировки по напряжению;
- 31 с независимой выдержкой времени с блокировкой по напряжению;
- 31 и 32 с независимыми выдержками времени без блокировок по напряжению;

■ 31 или 32 в качестве токовой отсечки без выдержки времени.

Кроме перечисленных, можно выполнить и другие эксперименты, любым образом комбинируя уставки защит.

При использовании двух МТЗ линий полезно убедиться в том, что защита первой линии действительно резервирует защиту второй линии. Для этого нужно смоделировать отказ выключателя Q2 (например, перевести его в ручной режим работы и включить), после чего провести эксперимент, устраивая короткое замыкание в конце второй линии, и убедиться, что срабатывает защита первой.

Электрическая схема соединения функциональных блоков показана на рис. 12.

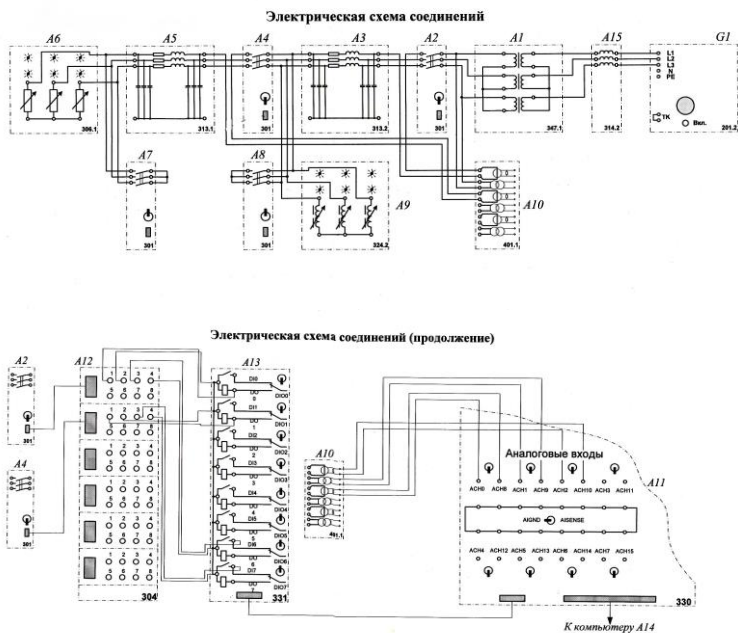


Рис.12. Функциональная схема исследования МТЗ и ТО ЛЭП с односторонним питанием

Условные обозначения функциональных блоков и их характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2

Блоки и аппаратура, используемые в лабораторной работе

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A4, A7, A8	Трехполосный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A3, A5	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 x 0,5 А
A6	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт;
A9	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50Гц; 3x0...40 Вар;
A10	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A11	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A12	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6x8 гнезд
A13	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выхо- дов
A14	Персональный компьютер	310	IBM совмести- мый, Windows 9*; монитор, мышь, клавиатура, плата сбора ин- формации PCI 6024E
A15	Линейный реактор	314.2	220/380 В; 50 Гц; 0,5 А; 0,3 Гн/10 Ом

Активная нагрузка А6 через модели линий электропередачи А3, А5, выключатели А2, А4, линейный реактор А15 и трехфазную трансформаторную группу А1 подключена к источнику G1. К последнему через модель линии А3, выключатель А2, трехфазную трансформаторную группу А1 и линейный реактор А15 подключена также индуктивная нагрузка А9.

Выключатели А7, А8 используются как короткозамыкатели и присоединены к шинам соответственно активной А6 и индуктивной А9 нагрузок.

В начале каждой из линий электропередачи включен один трансформатор тока (на фазный ток) и один трансформатор напряжения (на междуфазное напряжение) блока А10 измерительных трансформаторов тока и напряжения. Эти величины используются в качестве входных данных для программы, имитирующей работу двух токовых защит рассматриваемых линий.

Вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения блока А10 подключены к аналоговым входам коннектора А11, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода PCI6024E персонального компьютера А14.

Розетки «УПР» трехполюсных выключателей А2 и А4 гибкими кабелями подключены к розеткам терминала А12, гнезда которого соединены с гнездами блока А13 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

IV. Порядок проведения лабораторной работы

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда «ТК» источника G1.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей А2 и А4 установите в положение «АВТ.», выключателей А7 и А8 - в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока А1 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линии электропередачи А3 переключателями установите, например, следующими: $R = 200 \text{ Ом}$, $L/R_L = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C_1=C_2=0 \text{ мкФ}$; линии электропередачи А5 - следующими: $R = 50 \text{ Ом}$, $L/R_L=0,3/8 \text{ Гн/Ом}$, $C_1=C_2=0 \text{ мкФ}$. Выберите мощность активной нагрузки А6, например, 100% от 50 Вт во всех трех фазах. Выберите мощность индуктивной нагрузки А9, например, 50% от 40 Вар во всех трех фазах.

- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей А2, А4, А7, А8, блока А13 ввода-вывода цифровых сигналов.

- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А14, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «МТЗ двух линий.exe».

- Смоделируйте требуемый вариант защиты, для чего задайте уставки, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.

- Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись», введите защиты нажатием на соответствующую кнопку и непосредственно после этого смоделируйте короткое замыкание в конце одной из линий, включив выключатели А7 или А8. После отключения защитой «поврежденной» линии остановите запись. Проанализируйте отображенные осциллограммы токов и напряжений линий, а также появившуюся на экране информацию о последовательности произошедших событий.

- При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

– Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора - справа налево и снизу вверх.

– Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

– Для удобства определения значений величин по графикам в нижней части экрана отображаются текущие координаты указателя мыши.

– Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по протоколу произошедших событий.

– Уставки токов и напряжений следует задавать амплитудными значениями.

– При использовании зависимой от тока характеристики выдержки времени нужно иметь ввиду, что защита срабатывает только, если ток схемы становится больше уставки защиты по току.

– Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Его длину можно изменять в пункте меню «Настройки».

- По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков A2, A4, A7, A8 и A13.

В рамках рассматриваемой работы можно выполнить, как минимум, 5 экспериментов: МТ31 с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению, МТ31 с зависимой выдержкой времени без блокировки по напряжению, МТ31 с независимой выдержкой времени с блокировкой по напряжению, МТ31 и МТ32 с независимыми выдержками времени без блокировок по напряжению, токовая отсечка без выдержки времени. Кроме перечисленных, можно выполнить и другие эксперименты, любым образом комбинируя уставки защит.

При использовании сразу двух МТЗ линий целесообразно убедиться в том, что защита линии АЗ действительно резервирует защиту линии А5. Для этого нужно смоделировать отказ выключателя А4 (например, включить его и перевести в ручной режим работы), после чего произвести эксперимент, устраивая короткое замыкание в конце линии А5, и убедиться, что срабатывает защита линии АЗ.

Примеры результатов некоторых опытов приведены в приложении.

По результатам проведенных экспериментов нарисовать осциллограммы токов при КЗ в точка 1 и 2, времятоковые характеристики для МТЗ и ТО в соответствии с примерами, приведенными в Приложении. Составить заключение.

V. Контрольные вопросы

1. Виды токовых защит, их краткая характеристика и отличие друг от друга.
2. Принцип действия и селективность МТЗ.
3. Выбор тока срабатывания МТЗ.
4. Выбор выдержки времени МТЗ.
5. Схема двухфазной двухрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
6. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
7. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с зависимой выдержкой времени.
8. Согласование защит по чувствительности.
9. Принцип действия ТО.
10. Мгновенные ТО на линиях с односторонним питанием.
11. ТО с выдержкой времени.
12. ТО с блокировкой по напряжению.
13. Схема электроснабжения для проведения экспериментов.
14. Схема соединений функциональных блоков при проведении лабораторной работы.
15. Порядок проведения лабораторной работы.

Приложение

Примеры результатов экспериментов

1. МТЗ1 с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению

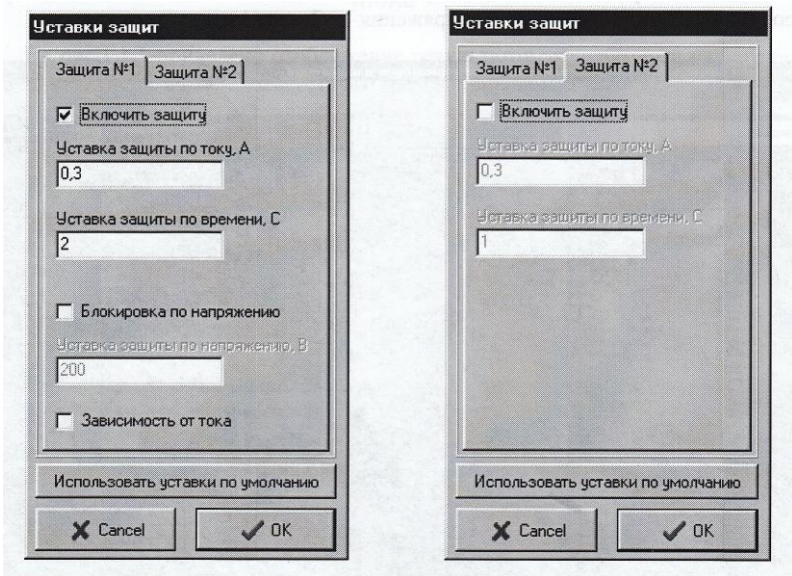


Рис. П1. Отображение уставок защит на экране монитора

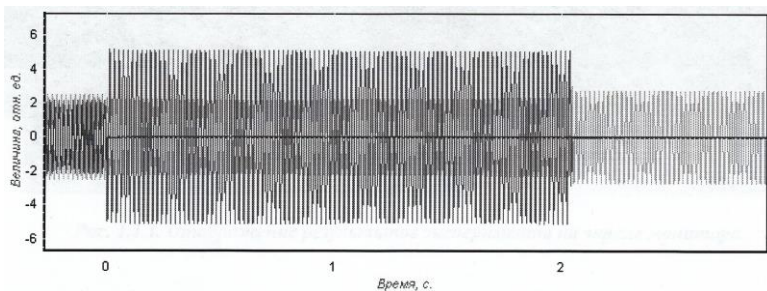


Рис. П2. Отображение результатов эксперимента на экране монитора

2. МТЗ1 с зависимой выдержкой времени без блокировки по напряжению

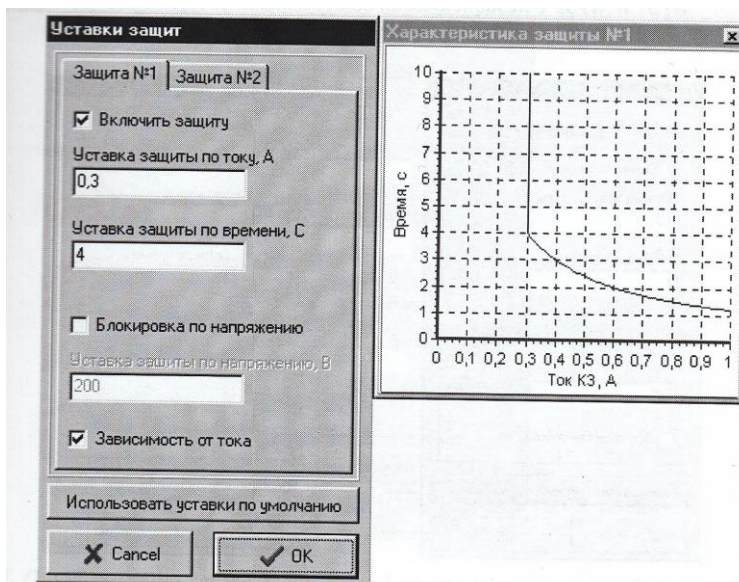


Рис. ПЗ. Отображение уставок защиты 1 на экране монитора (вторая защита выведена)

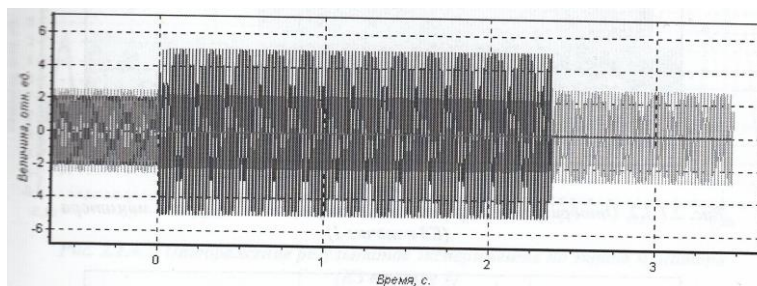


Рис. П4. Отображение результатов эксперимента на экране монитора

3. МТ31 и МТ32 с независимыми выдержками времени без блокировок по напряжению

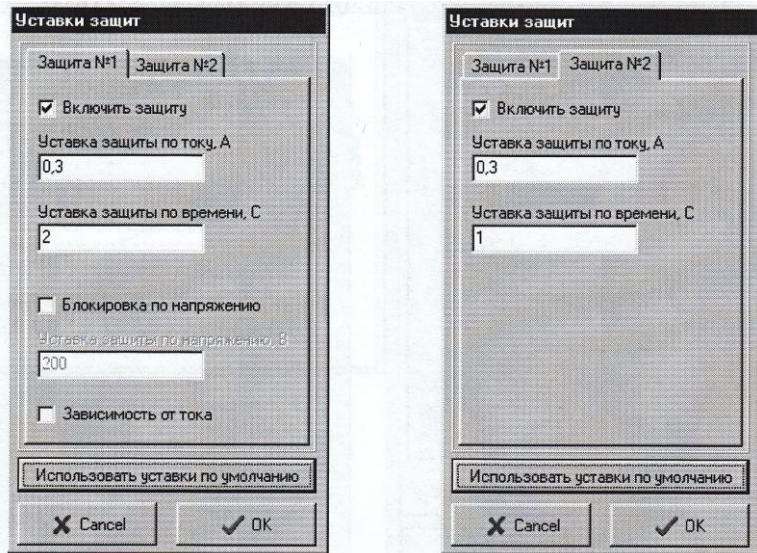


Рис. П5. Отображение уставок защит на экране монитора (заданы по умолчанию)

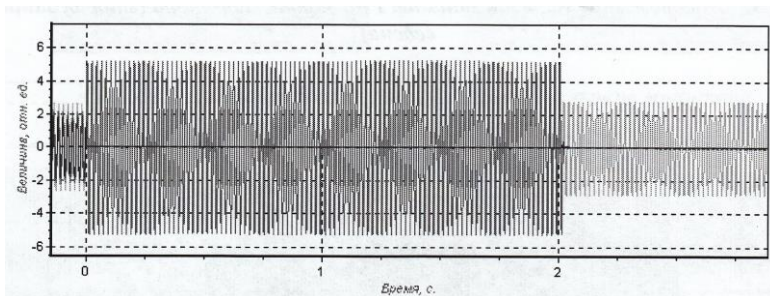


Рис. П6. Отображение результатов эксперимента на экране монитора (КЗ в точке 1)

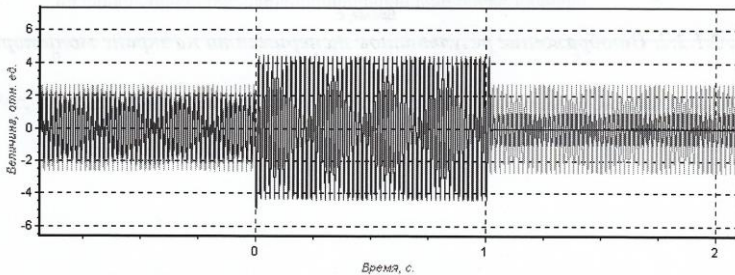


Рис. П7. Отображение результатов эксперимента на экране монитора (КЗ в точке 2)

4. Токовая отсечка первой линии без выдержки времени

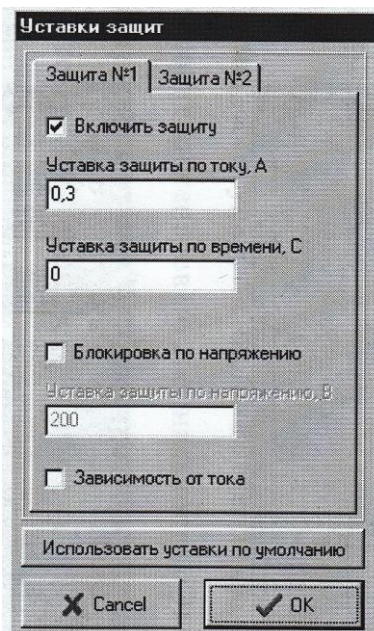


Рис. П8. Отображение уставок защиты 1 на экране монитора (защита 2 выведена)

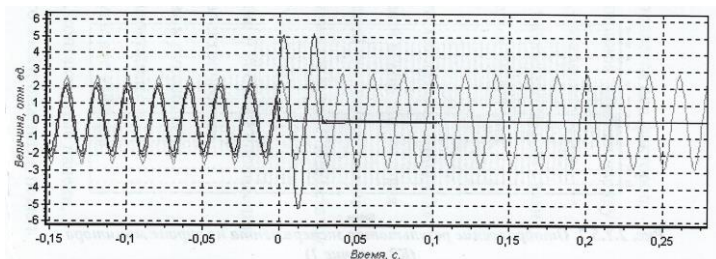


Рис. П9. Отображение результатов эксперимента на экране монитора (КЗ в точке 1)

5. Токовая отсечка первой линии с выдержкой времени и токовая отсечка второй линии без выдержки времени

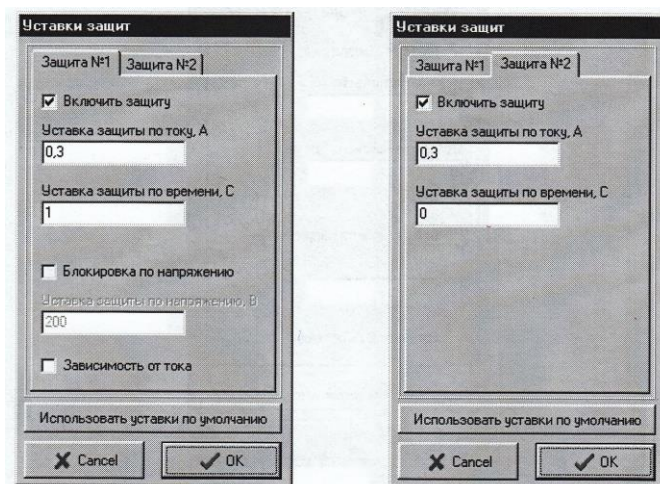


Рис. П10. Отображение уставок защит на экране монитора

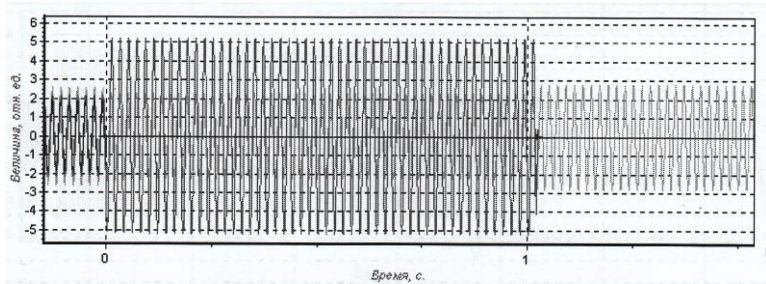


Рис. П11. Отображение результатов эксперимента на экране монитора (КЗ в точке 1)

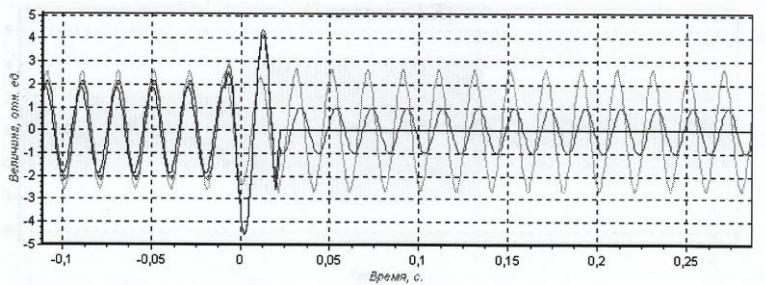


Рис. П12. Отображение результатов эксперимента на экране монитора (КЗ в точке 2)

Литература

1. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2008.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 2008.
3. Киреева Э. А., Цырук С. А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2010.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) федерального университета

Подписано в печать 06.05. 2015г.
Формат 60x84/16. Печать ризографическая
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman»
Усл. п. л. 5,1 Уч.-изд. л. 5,1
Тираж 50 экз. Заказ № 575 - 90

423810, г.Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 68/19
тел./факс (8552) 39-65-99 e-mail: ic-nchi-kpfu@mail.ru