НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ

РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОТВЕТВИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ,

реализованной на базе терминалов производства

ООО «НПП Бреслер»

Чебоксары 2015

УДК 621.316.925
ББК 31.27-05

Печатается по решению Ученого совета НОУ ДПО «ИПК РЗА»

Научный редактор А.В. Булычев, д-р техн. наук, профессор

Рекомендации по выбору параметров срабатывания адаптивной защиты дальнего резервирования ответвительных трансформаторов линий электропередачи, реализованной на базе терминалов производства ООО «НПП Бреслер» / Васильев Д.С., Тарасова В.Н. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2015. – 60 с.

Изложены рекомендации по выбору параметров срабатывания адаптивной защиты дальнего резервирования ответвительных трансформаторов, реализованной в устройствах ООО «НПП Бреслер». Кратко рассмотрены основные алгоритмы защиты, а также приведен пример расчета параметров срабатывания ЗДР.

Рекомендации предназначены для специалистов, работающих в области релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем.

УДК 621.316.925
ББК 31.27-05
© ИПК РЗА, 2015

Оглавление

1. Общие сведения 4

2. Реализация дальнего резервирования 5

2.1. Имитационное и алгоритмическое моделирование в релейной защите 5

2.2. Исходные данные для создания имитационной модели 8

2.3. Создание алгоритмической модели 10

2.4. Замер виртуального реле сопротивления защиты 14

2.5. Область срабатывания виртуального реле сопротивления 15

2.6. Максимальное и минимальное приращение тока прямой и обратной последовательности 18

2.7. Параметры срабатывания защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП 20

3. Программа расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования ZDR 24

4. Параметры срабатывания пусковых и блокирующих органов 27

5. Таймеры ЗДР 34

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Пример расчета защиты дальнего резервирования 36

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Перечень измерительных органов и таймеров защиты дальнего резервирования 56

Список литературы 59

В данном пособии приведены указания по выбору параметров срабатывания адаптивной защиты дальнего резервирования ответвительных трансформаторов линий электропередачи, выполненной на базе терминалов производства ООО «НПП Бреслер»; ЗДР может быть реализована как отдельно в терминале «Бреслер-0107.030», так и в качестве дополнительной функции в терминалах ступенчатых защит присоединения серии «Бреслер-0107.51х» и защит присоединения для обходного выключателя серии «Бреслер-0107.61х».

Данное пособие носит рекомендательный характер и предназначено для эксплуатационных организаций, а также может использоваться проектными организациями.

Более полная информация об устройствах адаптивной защиты дальнего резервирования содержится в Руководствах по эксплуатации терминала БРСН.656122.030 и шкафа БРСН.656453.030.

1. Общие сведения

Защита дальнего резервирования предназначена для селективного отключения линии электропередачи напряжением 35–220 кВ при замыканиях в силовых трансформаторах и на стороне низшего напряжения ответвительных подстанций.

Для обеспечения дальнего резервирования в настоящее время считается обязательной установка на линиях 110 кВ и выше с двух- и многосторонним питанием трехступенчатых дистанционных защит от междуфазных замыканий независимо от полноты ближнего резервирования защиты. Осуществить защитами линий дальнее резервирование при замыканиях в ответвительной подстанции в общем случае еще более затруднительно, чем при замыканиях на линиях. Это связано с ограниченными возможностями достижения необходимой чувствительности защит линий и обусловлено тем, что нагрузка линии, определяющая параметры срабатывания последних ступеней защиты линий, в большинстве случаев значительно превышает номинальную мощность ответвительного трансформатора.

При реализации дальнего резервирования защит трансформаторов ответвительных подстанций возникает ряд проблем:

– отстройка от нагрузочных (транзитных) токов линий;

– выбор характеристик срабатывания реле сопротивления;

– согласование с линейными защитами и с защитами, установленными на отпайках;

– диапазон изменения токов в режиме аварии на линии превышает диапазон изменения токов при замыканиях в трансформаторах ответвительных подстанций;

– необходимость учитывать наличие тяговой нагрузки на некоторых линиях.

В «НПП Бреслер» проблема выявления повреждения ответвительного трансформатора решена путем расширения информационной базы [4]. Защита дальнего резервирования производства ООО «НПП Бреслер» оперирует всей доступной информацией при наблюдении за линией электропередачи с одного конца: током и напряжением предшествующего и аварийного режимов [2, 3].

Защита устанавливается на головном конце линии электропередачи, рассчитана как на радиальные, так и на магистральные линии, а также на сети внешнего электроснабжения с тяговой нагрузкой. Для блокировки и согласования логики с действием других защит предусмотрены дискретные входы.

ЗДР реализована как отдельная защита в устройстве «Бреслер-0107.030», а также может быть реализована как дополнительная функция в устройствах «Бреслер-0107.510» (терминал ступенчатых защит присоединения 110-220 кВ), «Бреслер-0107.511» (терминал ступенчатых защит присоединения и автоматики управления выключателем 110-220 кВ), «Бреслер-0107.610» (терминал защит присоединений для обходного выключателя 110-220 кВ), «Бреслер-0107.611» (терминал защиты и автоматики управления обходным выключателем 110-220 кВ).

2. Реализация дальнего резервирования

2.1. Имитационное и алгоритмическое моделирование в релейной защите

Сложность реализации защиты дальнего резервирования состоит в том, что защите, установленной на головном конце линии электропередачи, необходимо отслеживать токи и напряжения в ответвительных подстанциях, чтобы идентифицировать повреждение на низшей стороне силовых трансформаторов.

Для решения этой задачи в релейной защите используется моделирование участков энергосистемы. Наиболее широко распространены два типа моделей защищаемых объектов: имитационная (ИМО) и алгоритмическая (АМО).

Имитационная модель является математическим описанием рассматриваемого объекта и становится его представлением при разработке, анализе и проверке алгоритмов РЗ. От ИМО требуется получить реакцию на различные коммутации в сети: включение на нагрузку, появление различного рода несимметрии и т.д.

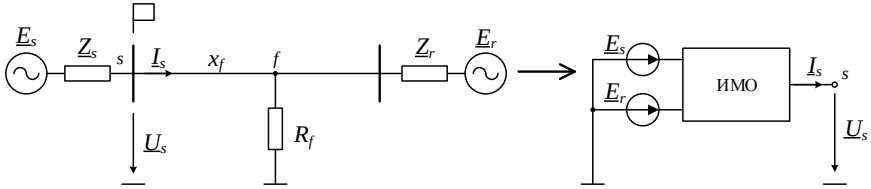

Рис. 1. Имитационная модель линии электропередачи

В качестве примера на рисунке 1 представлен переход от реального объекта – линии электропередачи – к его ИМО (для простоты приведена однолинейная схема ЛЭП с двухсторонним питанием). Системы слева и справа задаются соответствующими величинами ЭДС $\underline{E}_s$, $\underline{E}_r$ и сопротивлениями $\underline{Z}_s$, $\underline{Z}_r$, а повреждение – параметрами аварии (координатой места повреждения x_f и переходным сопротивлением R_f). Как видим, результатом моделирования являются величины токов $\underline{\mathbf{I}}_s$ и напряжений $\underline{\mathbf{U}}_s$ в месте установки защиты, которые образуют вектор наблюдения $\underline{\mathbf{V}}_s$

$$\underline{\mathbf{V}}_s = \left[\underline{\mathbf{U}}_s \quad \underline{\mathbf{I}}_s\right].$$

Алгоритмическая модель же позволяет оценить электрические величины $\underline{\mathbf{I}}_f$ и $\underline{\mathbf{U}}_f$ в месте предполагаемого повреждения *f* (рисунок 2), имея математическую модель объекта и вектор наблюдения $\underline{\mathbf{V}}_s$, который может быть получен как устройством, установленным на объекте, так и ИМО данного объекта. АМО, таким образом, представляет собой некое виртуальное устройство, фиксирующее токи и напряжения в точке, на самом деле, не доступной нам для наблюдения.

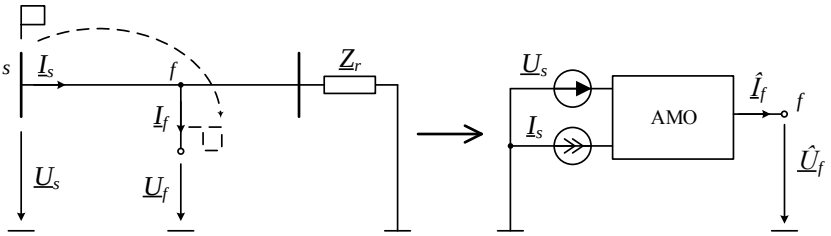

Рис.2. Алгоритмическая модель лини электропередачи

В основу защиты дальнего резервирования, производимой ООО «НПП Бреслер», положен адаптивный дистанционный принцип, оперирующий с алгоритмической моделью объекта, что равноценно установке в ответвлении виртуального реле сопротивления (ВРС), оценивающего ток $\underline{I}_f$ и напряжение $\underline{U}_f$ в ответвлении f и определяющего факт замыкания (рисунок 3). С помощью алгоритмических моделей удаётся настроить виртуальные реле на каждую защищаемую ответвительную подстанцию, если их несколько.

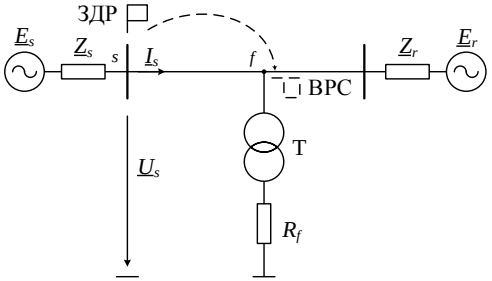

Рис. 3. Расположение виртуального реле сопротивления

В данном пособии приведена методика расчета параметров ЗДР, при котором ВРС устанавливается на стороне высшего напряжения ответвительного трансформатора, как показано на рисунке 3. Такое расположение виртуального реле позволяет в значительной мере упростить расчет параметров срабатывания защиты дальнего резервирования.

Алгоритм ЗДР позволяет эффективно защищать ответвительные трансформаторы сложной конфигурации. В таком случае создается несколько

алгоритмических моделей, виртуальные реле которых устанавливаются в точку *f* (рисунок 4).

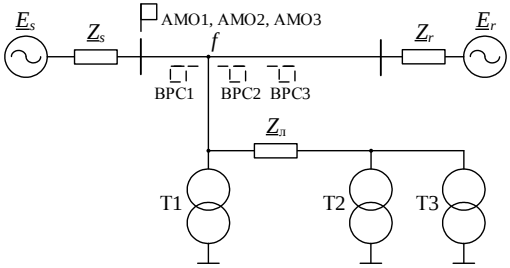

Рис. 4. Расположение ВРС на схеме сети с ответвлением сложной конфигурации

В случае, если в зону резервирования ЗДР входит трехобмоточный трансформатор, для осуществления его резервирования создаются две алгоритмические модели: для резервирования при замыканиях на стороне низшего и среднего напряжения трансформатора, как показано на рисунке 5. Последующие расчеты моделей ведутся независимо.

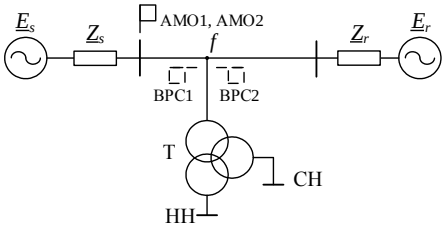

Рис. 5. Расположение ВРС на схеме сети с трехобмоточным ответвительным трансформатором

2.2. Исходные данные для создания имитационной модели

Для создания имитационной модели защищаемого объекта и последующего расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования требуются следующие данные:

– схема линии электропередачи с ответвительными подстанциями (для расчета параметров срабатывания защиты схему участка энергосистемы, на

котором устанавливается ЗДР, необходимо свести к одному из трех видов схем, приведенных на рисунке 6);

– данные по измерительным трансформаторам тока и напряжения;

– параметры линии (длины участков однородности ЛЭП, типы опор и проводов или эквивалентные сопротивления прямой последовательности участков линии);

– параметры эквивалентных питающих систем в максимальном и минимальном режимах;

– параметры ответвительных подстанций (паспортные данные ответвительных трансформаторов, данные об устройстве регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (РПН).

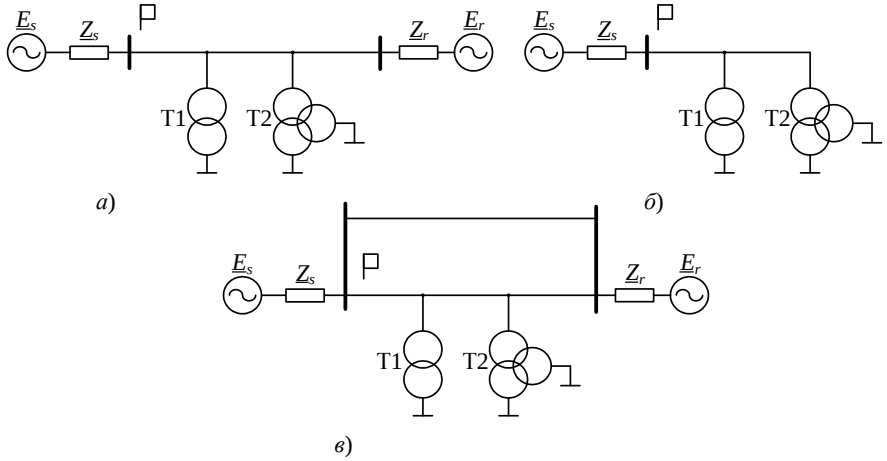

Рис. 6. Возможные схемы защищаемых объектов
а) схема ЛЭП с двухсторонним питанием;
б) схема ЛЭП с односторонним питанием;
в) схема ЛЭП с обходной связью

Для расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования необходимо получить следующие величины (на примере линии электропередачи с двухсторонним питанием и двумя ответвительными подстанциями):

– $\underline{E}_s$ – ЭДС эквивалентной системы относительно места установки защиты («за спиной»);

– $\underline{E}_r$ – ЭДС эквивалентной системы с противоположного конца линии электропередачи;

– $\underline{Z}_s^{мин}$, $\underline{Z}_s^{макс}$, $\underline{Z}_r^{мин}$, $\underline{Z}_r^{макс}$ – эквивалентное сопротивление системы «за спиной» и с противоположного конца в минимальном и максимальном режимах;

– $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ – эквивалентное сопротивление участков линии;

– $\underline{Z}_{отп1}$, $\underline{Z}_{отп2}$ – эквивалентное сопротивление участка линии в ответвлении;

– $\underline{Z}_{т1}$, $\underline{Z}_{т2}^{вн}$, $\underline{Z}_{т2}^{сн}$, $\underline{Z}_{т2}^{нн}$ – эквивалентные сопротивления трансформаторов;

– $\underline{Z}_{нг1}^{мин}$, $\underline{Z}_{нг1}^{макс}$, $\underline{Z}_{нг2}^{сн\ мин}$, $\underline{Z}_{нг2}^{сн\ макс}$, $\underline{Z}_{нг2}^{нн\ мин}$, $\underline{Z}_{нг2}^{нн\ макс}$ – минимальные и максимальные сопротивления нагрузки трансформаторов.

На основе имеющихся данных создается имитационная модель линии электропередачи (пример полученной имитационной модели приведен на рисунке 7).

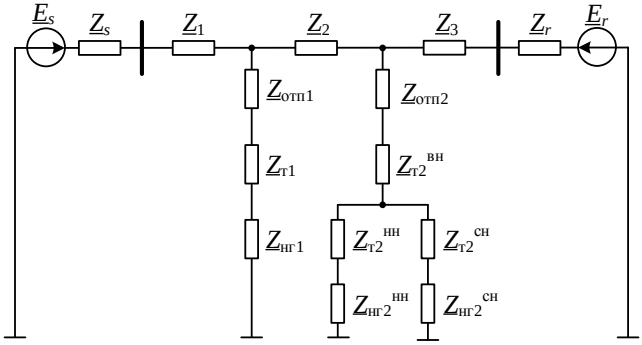

Рис. 7. Имитационная модель ЛЭП с двухсторонним питанием

2.3. Создание алгоритмической модели

Чтобы отстроиться от нагрузочного режима в алгоритме ЗДР используются собственно аварийные составляющие, под которыми понимаются разности векторов тока или напряжения в текущем и предаварийном режиме

$$\underline{U}^{ав} = \underline{U}^{тк} - \underline{U}^{пд};$$

$$\underline{I}^{\text{ав}} = \underline{I}^{\text{тк}} - \underline{I}^{\text{пд}}.$$

Такой математический прием описывает разделение алгоритмической модели объекта на модель предшествующего и собственно аварийного режимов. На рисунке 8 показаны схемы текущего, предшествующего и собственно аварийного режимов.

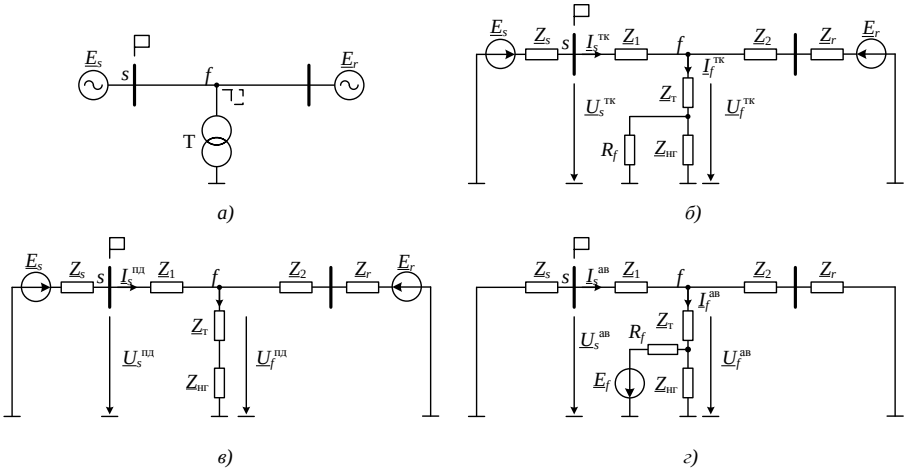

Рис. 8. Алгоритм работы виртуального реле сопротивления
а) схема сети;
б) модель сети в режиме замыкания;
в) модель предаварийного режима;
г) модель собственно аварийного режима

Модель предшествующего режима формирует замер напряжений $\underline{U}_f^{\text{пд}}$ в ответвлении по замерам напряжения $\underline{U}_s^{\text{пд}}$ и тока $\underline{I}_s^{\text{пд}}$ из места наблюдения. АМО в предрежиме представлена формулой:

$$\underline{U}_f^{\text{пд}} = \underline{K}_1^{\text{пд}} \underline{U}_s^{\text{пд}} + \underline{K}_2^{\text{пд}} \underline{I}_s^{\text{пд}}, \qquad (1)$$

где $\underline{U}_s^{\text{пд}}$ – фазное напряжение в предрежиме в месте установки защиты, В;

$\underline{I}_s^{\text{пд}}$ – ток в предрежиме в месте установки защиты, А;

$\underline{K}_1^{\text{пд}}$, $\underline{K}_2^{\text{пд}}$ – передаточные коэффициенты предрежима АМО;

$\underline{U}_f^{\text{пд}}$ – фазное напряжение предрежима в ответвлении, В.

В предшествующем режиме в ответвлении отсутствовали токи, поскольку в предшествующем режиме отсутствовало повреждение и рассматриваемый трансформатор работал на холостом ходу (влияние нагрузки учитывается при построении уставочной характеристики, так как учет нагрузки является сложной задачей по причине неравномерности уровня загрузки трансформатора, а также во многих случаях отсутствия данных):

$$\underline{I}_f^{\text{пд}} = 0 .$$

Для модели, схема которой изображена на рисунке 8, выражение (1) примет вид при условии $\underline{Z}_{\text{нг}} \to \infty$:

$$\underline{U}_f^{\text{пд}} = \underline{U}_s^{\text{пд}} - \underline{I}_s^{\text{пд}} \underline{Z}_1 .$$

Из последнего выражения видно, что передаточные коэффициенты предшествующего режима равны $K_1^{\text{пд}} = 1$ и $K_2^{\text{пд}} = -\underline{Z}_1$.

Модель собственно аварийного режима формирует замер напряжений $\underline{U}_f^{\text{ав}}$ и токов $\underline{I}_f^{\text{ав}}$ в ответвлении по замерам собственно аварийных составляющих напряжения $\underline{U}_s^{\text{ав}}$ и тока $\underline{I}_s^{\text{ав}}$ из места установки защиты. Модель собственно аварийного режима представлена формулой:

$$\begin{aligned} \underline{U}_f^{\text{ав}} &= \underline{K}_1^{\text{ав}} \underline{U}_s^{\text{ав}} + \underline{K}_2^{\text{ав}} \underline{I}_s^{\text{ав}}, \\ \underline{I}_f^{\text{ав}} &= \underline{K}_3^{\text{ав}} \underline{U}_s^{\text{ав}} + \underline{K}_4^{\text{ав}} \underline{I}_s^{\text{ав}}, \end{aligned} , \qquad (2)$$

где $\underline{U}_s^{\text{ав}}$ – фазное напряжение собственно аварийного режима в месте установки защиты, В;

$\underline{I}_s^{\text{ав}}$ – ток собственно аварийного режима в месте установки защиты, А;

$\underline{K}_1^{\text{ав}}$, $\underline{K}_2^{\text{ав}}$, $\underline{K}_3^{\text{ав}}$, $\underline{K}_4^{\text{ав}}$ – передаточные коэффициенты собственно аварийного режима АМО;

$\underline{U}_f^{\text{ав}}$ – напряжение собственно аварийного режима в ветви предполагаемого повреждения, В;

$\underline{I}_f^{\text{ав}}$ – ток в ответвлении собственно аварийного режима, А.

Составляющие собственно аварийного режима в месте наблюдения определяются как комплексная разность $\underline{U}_s^{\text{ав}} = \underline{U}_s^{\text{тк}} - \underline{U}_s^{\text{пд}}$, $\underline{I}_s^{\text{ав}} = \underline{I}_s^{\text{тк}} - \underline{I}_s^{\text{пд}}$.

Передаточные коэффициенты АМО зависят только от пассивных параметров схемы замещения предшествующего и собственно аварийного режимов.

Учитывая, что $\underline{I}_f^{\text{тк}} = \underline{I}_f^{\text{ав}}$, $\underline{U}_f^{\text{тк}} = \underline{U}_f^{\text{ав}} + \underline{U}_f^{\text{пд}}$, получаем текущие значения токов и напряжений в ответвлении по составляющим предшествующего и собственно аварийного режимов. Алгоритмическая модель объекта описана формулой:

$$\underline{U}_f^{\text{тк}} = \underline{K}_1^{\text{пд}} \underline{U}_s^{\text{пд}} + \underline{K}_2^{\text{пд}} \underline{I}_s^{\text{пд}} + \underline{K}_1^{\text{ав}} \underline{U}_s^{\text{ав}} + \underline{K}_2^{\text{ав}} \underline{I}_s^{\text{ав}},$$

$$\underline{I}_f^{\text{тк}} = \underline{K}_3^{\text{ав}} \underline{U}_s^{\text{ав}} + \underline{K}_4^{\text{ав}} \underline{I}_s^{\text{ав}},$$

где $\underline{U}_f^{\text{тк}}$ – текущее значение фазного напряжения в ветви повреждения, В;

$\underline{I}_f^{\text{тк}}$ – текущее значение тока в ветви предполагаемого повреждения, А.

В рассматриваемом примере (рисунок 8,г) коэффициенты $K_1^{\text{ав}}$ и $K_2^{\text{ав}}$ собственно аварийного режима можно найти из выражения: $\underline{U}_f^{\text{ав}} = \underline{U}_s^{\text{ав}} - \underline{I}_s^{\text{ав}} \underline{Z}_1$, и они равны $K_1^{\text{ав}} = 1$ и $K_2^{\text{ав}} = -\underline{Z}_1$.

Пользуясь схемой собственно аварийного режима, по законам Кирхгофа можно найти выражения для оставшихся двух передаточных коэффициентов собственно аварийного режима:

$$\begin{cases} \underline{U}_f^{\text{ав}} = \underline{U}_s^{\text{ав}} - \underline{I}_s^{\text{ав}} \cdot \underline{Z}_1; \\ -\underline{U}_f^{\text{ав}} + \underline{I}_r^{\text{ав}} \cdot \left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r\right) = 0; \\ -\underline{I}_f^{\text{ав}} + \underline{I}_s^{\text{ав}} - \underline{I}_r^{\text{ав}} = 0. \end{cases} \Rightarrow \quad K_3^{\text{ав}} = -\frac{1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}; \quad K_4^{\text{ав}} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}.$$

Таким образом, получена система из шести передаточных коэффициентов алгоритмической модели:

$$K_1^{\text{пд}} = 1; \qquad K_1^{\text{ав}} = 1;$$

$$K_2^{\text{пд}} = -\underline{Z}_1; \quad K_2^{\text{ав}} = -\underline{Z}_1;$$

$$K_3^{\text{ав}} = -\frac{1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r};$$

$$K_4^{\text{ав}} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}.$$

При расчете передаточных коэффициентов алгоритмической модели следует использовать значение сопротивления питающей системы с

противоположного конца, взятое в максимальном режиме (следовательно, сопротивление является минимальным).

2.4. Замер виртуального реле сопротивления защиты

Алгоритмическая модель, используемая в защите дальнего резервирования, включает в себя формирователь алгоритмического замера сопротивления, который объединяет информацию о токах и напряжениях различных режимов (предшествующего и собственно аварийного) в единый алгоритмический параметр – замер текущего сопротивления $\underline{Z}_f$ в месте установки ВРС. Специфика защищаемого объекта (ответвительного трансформатора) такова, что возможны только два вида повреждения стороне низшего напряжения трансформатора – междуфазное и трехфазное замыкания, т.е. можно рассматривать аварийные процессы только для безнулевых составляющих. В защите предусмотрен отдельный формирователь сопротивления для каждого вида замыкания.

Зная токи и напряжения прямой и обратной последовательности в ветви предполагаемого повреждения, можно сформировать три междуфазных и три трехфазных замера сопротивления.

Формирование замера сопротивления при трехфазном коротком замыкании:

$$\underline{Z}_f^{\text{К}(3)} = \frac{\underline{U}_{fa}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fa}^{\text{тк}}} = \frac{\underline{U}_{f1}^{\text{тк}} + \underline{U}_{f2}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{f1}^{\text{тк}} + \underline{I}_{f2}^{\text{тк}}} = \frac{\underline{U}_{f1}^{\text{пд}} + \underline{U}_{f1}^{\text{ав}} + \underline{U}_{f2}^{\text{пд}} + \underline{U}_{f2}^{\text{ав}}}{\underline{I}_{f1}^{\text{пд}} + \underline{I}_{f1}^{\text{ав}} + \underline{I}_{f2}^{\text{пд}} + \underline{I}_{f2}^{\text{ав}}} = \frac{\underline{U}_{f1}^{\text{пд}} + \underline{U}_{f1}^{\text{ав}} + \underline{U}_{f2}^{\text{пд}} + \underline{U}_{f2}^{\text{ав}}}{\underline{I}_{f1}^{\text{ав}} + \underline{I}_{f2}^{\text{ав}}},$$

где $\underline{U}_{f1}^{\text{пд}}$ – напряжение прямой последовательности предрежима в месте установки ВРС, В;

$\underline{U}_{f2}^{\text{пд}}$ – напряжение обратной последовательности предрежима в месте установки ВРС, В;

$\underline{U}_{f1}^{\text{ав}}$ – напряжение прямой последовательности собственно аварийного режима в месте установки ВРС, В;

$\underline{U}_{f2}^{\text{ав}}$ – напряжение обратной последовательности собственно аварийного режима в месте установки ВРС, В;

$\underline{I}_{f1}^{\text{ав}}$ – ток прямой последовательности собственно аварийного режима в месте установки ВРС, А;

$\underline{I}_{f2}^{\text{ав}}$ – ток обратной последовательности собственно аварийного режима в месте установки ВРС, А.

Замер сопротивления в месте установки ВРС при трехфазном коротком замыкании на линии без тяговой нагрузки примет вид:

$$\underline{Z}_f^{\text{К}(3)} = \frac{\underline{K}_1^{\text{пд}}\underline{U}_{s1}^{\text{пд}} + \underline{K}_2^{\text{пд}}\underline{I}_{s1}^{\text{пд}} + \underline{K}_1^{\text{ав}}\underline{U}_{s1}^{\text{ав}} + \underline{K}_2^{\text{ав}}\underline{I}_{s1}^{\text{ав}}}{\underline{K}_3^{\text{ав}}\underline{U}_{s1}^{\text{ав}} + \underline{K}_4^{\text{ав}}\underline{I}_{s1}^{\text{ав}}}.$$

Для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/D-11 при междуфазном коротком замыкании формируются три фазных замера сопротивлений $\underline{Z}_f^{\text{К}(2)} = [\underline{Z}_{fa}^{\text{К}(2)}\ \underline{Z}_{fb}^{\text{К}(2)}\ \underline{Z}_{fc}^{\text{К}(2)}]^{\text{Т}}$.

Для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y-12 при междуфазном коротком замыкании формируются три междуфазных замера сопротивлений $\underline{Z}_f^{\text{К}(2)} = [\underline{Z}_{fab}^{\text{К}(2)}\ \underline{Z}_{fbc}^{\text{К}(2)}\ \underline{Z}_{fca}^{\text{К}(2)}]^{\text{Т}}$.

Таким образом, в защите дальнего резервирования заложен дистанционный принцип выявления факта повреждения защищаемого трансформатора, защита оперирует оцениваемыми алгоритмической моделью величинами. В общем случае методика получения замера описана формулами:

$$\underline{Z}_f^{\text{К}(3)} = \frac{\underline{U}_f^{\text{тк}}}{\underline{I}_f^{\text{тк}}};$$

$$\underline{Z}_{fbc}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fb}^{\text{тк}} - \underline{U}_{fc}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fb}^{\text{тк}} - \underline{I}_{fc}^{\text{тк}}};\ \underline{Z}_{fac}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fa}^{\text{тк}} - \underline{U}_{fc}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fa}^{\text{тк}} - \underline{I}_{fc}^{\text{тк}}};\ \underline{Z}_{fab}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fa}^{\text{тк}} - \underline{U}_{fb}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fa}^{\text{тк}} - \underline{I}_{fb}^{\text{тк}}};, \qquad (3)$$

$$\underline{Z}_{fa}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fa}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fa}^{\text{тк}}};\quad \underline{Z}_{fb}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fb}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fb}^{\text{тк}}};\quad \underline{Z}_{fc}^{\text{К}(2)} = \frac{\underline{U}_{fc}^{\text{тк}}}{\underline{I}_{fc}^{\text{тк}}}.$$

2.5. Область срабатывания виртуального реле сопротивления

На практике модель адекватна объекту не в полной мере, что в свою очередь приводит к смещению замера сопротивления, рассчитанного по выражениям (3) и, соответственно, к расширению области наблюдаемых режимов, как показано на рисунке 9. Это может быть вызвано изменением нагрузки трансформатора, оперативными переключениями на смежных

объектах или изменениями параметров самого трансформатора (например, при изменении положения РПН).

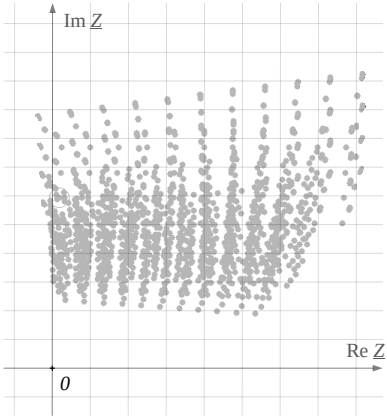

Рис. 9. Множество замеров ВРС на комплексной плоскости

При расчете параметров срабатывания защиты используется линейная аппроксимация сложной области наблюдаемых режимов четырехугольником в целях упрощения операции определения попадания замера ВРС в область, ограниченную уставочной характеристикой (рисунок 10). Замеры ВРС рассчитываются по выражениям 3, причем для каждого ВРС строятся свои характеристики срабатывания при трехфазном и междуфазном замыканиях.

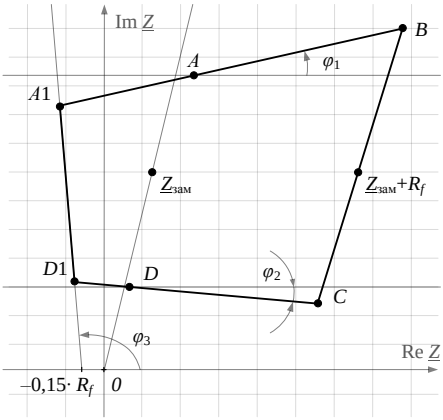

Рис. 10. Характеристика срабатывания виртуального реле сопротивления

Расчет всех точек комплексной плоскости, соответствующих замерам ВРС, является долгим и достаточно сложным процессом, поэтому для ручного расчета разработана методика построения характеристики срабатывания виртуального реле, учитывающая основные законы перемещения годографа замера ВРС.

Характеристика срабатывания ВРС ограничена четырьмя отрезками, как показано на рисунке 10, и строится следующим образом: на комплексную плоскость наносится точка $\underline{Z}_{\text{отп}} + \underline{Z}_{\text{т}}$, где $\underline{Z}_{\text{т}}$ сопротивление трансформатора в номинальном режиме, $\underline{Z}_{\text{отп}}$ сопротивление участка от места установки ВРС до трансформатора. Координаты точки А, через которую проводится прямая, ограничивающая область срабатывания сверху, находятся следующим образом:

$$\underline{A} = \left(\underline{Z}_{\text{т}} \cdot k_{\text{РПН}}^{\text{макс}} + \underline{Z}_{\text{отп}}\right) \cdot k_{\text{нг}} \cdot k_{\text{зап}}^{\text{макс}}, \qquad (4)$$

где $k_{\text{РПН}}^{\text{макс}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления трансформатора при крайнем положении РПН (формула для его расчета приведена в Приложении А; по умолчанию принимается равным 1,3);

$k_{\text{нг}}$ – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки на замер ВРС (выбирается из диапазона 1,01÷1,05);

$k_{\text{зап}}^{\text{макс}}$ – коэффициент запаса (по умолчанию принимается равным 1,1)

Область срабатывания ВРС АМО1 снизу ограничивается прямой, проходящей через точку *D*, координаты которой вычисляются следующим образом:

$$\underline{D} = \left(\underline{Z}_{\text{т}} \cdot k_{\text{РПН}}^{\text{мин}} \cdot k_{\text{зр}} + \underline{Z}_{\text{отп}}\right) \cdot k_{\text{нес_АМО}} \cdot k_{\text{зап}}^{\text{мин}}, \qquad (5)$$

где $k_{\text{РПН}}^{\text{мин}}$ – коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления трансформатора при крайнем положении РПН (формула для его расчета приведена в Приложении А; по умолчанию принимается равным 0,7);

$k_{\text{зр}}$ – коэффициент, учитывающий желаемую зону резервирования при внутренних замыканиях в ответвительном трансформаторе;

$k_{\text{зап}}^{\text{мин}}$ – коэффициент запаса (по умолчанию принимается равным 0,9);

$k_{\text{нес_АМО}}$ – коэффициент, отражающий степень несоответствия алгоритмической модели имитационной; вычисляется по формуле

$$k_{\text{нес_АМО}} = \left| \frac{\left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r^{\text{АМО}}\right) \cdot \left(\underline{Z}_s + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r\right)}{\left(\underline{Z}_s + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r^{\text{АМО}}\right) \cdot \left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r\right)} \right|,$$

где $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ – параметры схемы замещения модели, показанной на рисунке 8;

$\underline{Z}_s$, $\underline{Z}_r$ – параметры эквивалентных систем, при которых коэффициент $k_{\text{нес_АМО}}$ имеет минимальное значение, для инженерных расчетов выбираются параметры эквивалентных систем в минимальном режиме (сопротивления систем максимальные);

$\underline{Z}_r^{\text{АМО}}$ – минимальное значение эквивалентного сопротивления питающей системы на противоположном конце ЛЭП, при котором рассчитывалась АМО.

Верхняя граница характеристики имеет наклон, равный $\varphi_1 = 15°$, а нижняя граница наклонена на угол $\varphi_2 = 5°$.

Справа характеристика срабатывания ограничивается отрезком *BC*, лежащим на прямой, параллельной $O\underline{Z}_{\text{т}}$, смещенной на величину максимального переходного сопротивления R_f по действительной оси для замера при трехфазном замыкании, и на величину $R_f/2$ – при междуфазном замыкании. Для класса напряжения ЛЭП 110 кВ рекомендуется применять максимальное переходное сопротивление в месте замыкания 100 Ом, приведенное к ступени высшего напряжения. Для ЛЭП 35 кВ рекомендуется применять максимальное переходное сопротивление в месте замыкания 10 Ом, приведенное к ступени высшего напряжения.

Граница слева лежит на прямой *D1A1*, проходящей через точку с координатой $-0{,}15 \cdot R_f$ по действительной оси, имеющей угол наклона $\varphi_3 = 95°$.

2.6. Максимальное и минимальное приращение тока прямой и обратной последовательности

В перечень параметров срабатывания защиты дальнего резервирования входят максимальное и минимальное приращения тока прямой и обратной

последовательности в месте установки защиты для каждого защищаемого трансформатора.

Приращение тока в месте установки защиты равно разности величин соответствующих симметричных составляющих токов текущего и предшествующего режимов работы сети, взятой по модулю:

$$\Delta I_1 = \left| \underline{I}_{s1}^{\text{тк}} - \underline{I}_{s1}^{\text{пд}} \right|, \ \Delta I_2 = \left| \underline{I}_{s2}^{\text{тк}} - \underline{I}_{s2}^{\text{пд}} \right|.$$

Приращение тока прямой последовательности необходимо рассчитывать при моделировании трехфазных замыканий, а приращение тока обратной последовательности – при междуфазных замыканиях.

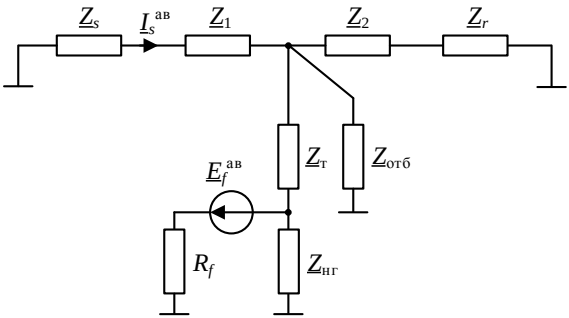

Рис. 11. Модель собственно аварийного режима

Для удобства ручного расчета следует воспользоваться схемой собственно аварийного режима (рисунок 11). В месте замыкания присутствует единственный источник ЭДС, равный напряжению предшествующего режима. В ветвь повреждения также включается переходное сопротивление R_f. На этапе составления схемы все ответвления на рассматриваемой транзитной линии удобнее эквивалентировать в одну точку, как показано на рисунке 11 (при помощи ветви отбора мощности нагрузки $\underline{Z}_{\text{отб}}$). В составленной схеме полученный ток $\underline{I}_s^{\text{ав}}$ будет равен приращению тока в месте установки защиты.

Поскольку определение минимального и максимального приращения методом перебора варьируемых параметров является трудоемкой задачей, в ручном расчете достаточно найти приращение при заданных режимах работы.

Для нахождения максимального приращения тока в месте установки защиты $\Delta I_{\max}$, нужно построить схему замещения сети со следующими параметрами:

- минимальное значение эквивалентного сопротивления системы «за спиной», $\underline{Z}_s^{\text{макс}}$ (максимальный режим работы системы «за спиной»);

- максимальное значение эквивалентного сопротивления системы с противоположного конца линии, $\underline{Z}_r^{\text{мин}}$ (минимальный режим работы системы с противоположного конца);

- минимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора;

- режим холостого хода ответвительных трансформаторов;

- минимальное переходное сопротивление в месте повреждения;

Для нахождения минимального приращения тока в месте установки защиты $\Delta I_{\min}$, нужно построить схему замещения сети со следующими параметрами:

- максимальное значение эквивалентного сопротивления системы «за спиной», $\underline{Z}_s^{\text{мин}}$ (минимальный режим работы системы «за спиной»);

- минимальное значение эквивалентного сопротивления системы с противоположного конца линии, $\underline{Z}_r^{\text{макс}}$ (максимальный режим работы системы с противоположного конца);

- максимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора;

- максимальная загрузка трансформаторов;

- максимальное переходное сопротивление в месте повреждения.

Диапазон приращения тока прямой и обратной последовательности задается во вторичных величинах с учетом коэффициента запаса. Коэффициент запаса для нижней границы выбирается из диапазона от 0,7 до 1. Для верхней границы – от 1 до 1,3.

2.7. Параметры срабатывания защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП

На линии с двухсторонним питанием виртуальные реле сопротивления настраиваются на работу ЛЭП в транзитном режиме (с включенным

выключателем на противоположном конце ЛЭП). Однако возможны режимы работы ЛЭП в радиальном режиме, например, если замыкание с противоположного конца будет отключено быстрее, в цикле АПВ, при опробовании ЛЭП и т.д. Для работы защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП используются дополнительные характеристики реле сопротивления АПВ.

Строятся общие для всех трансформаторов характеристики срабатывания при трехфазном и междуфазном замыкании. Задается минимальный режим работы системы «за спиной» (ЭДС системы равно 0,9·110 кВ, эквивалентное сопротивление системы $\underline{Z}_s = \underline{Z}_s^{\text{мин}}$). Характеристика срабатывания задается во вторичных величинах. Замеры сопротивления находятся по следующим выражениям:

$$\underline{Z}_a^{\text{тк}} = \frac{\underline{U}_a^{\text{тк}}}{\underline{I}_a^{\text{тк}}}; \quad \underline{Z}_b^{\text{тк}} = \frac{\underline{U}_b^{\text{тк}}}{\underline{I}_b^{\text{тк}}}; \quad \underline{Z}_c^{\text{тк}} = \frac{\underline{U}_c^{\text{тк}}}{\underline{I}_c^{\text{тк}}};$$

$$\underline{Z}_{bc}^{mк} = \frac{\underline{U}_b^{\text{тк}} - \underline{U}_c^{\text{тк}}}{\underline{I}_b^{\text{тк}} - \underline{I}_c^{\text{тк}}}; \quad \underline{Z}_{ac}^{\text{тк}} = \frac{\underline{U}_a^{\text{тк}} - \underline{U}_c^{\text{тк}}}{\underline{I}_a^{\text{тк}} - \underline{I}_c^{\text{тк}}}; \quad \underline{Z}_{ab}^{\text{тк}} = \frac{\underline{U}_a^{\text{тк}} - \underline{U}_b^{\text{тк}}}{\underline{I}_a^{\text{тк}} - \underline{I}_b^{\text{тк}}}.$$

Учитывая различные группы соединения обмоток ответвительных трансформаторов на стороне среднего и низшего напряжения, в логике защиты заложены отдельные уставочные области для фазных и междуфазных замеров сопротивления при междуфазных замыканиях.

Множество замеров сопротивления необходимо аппроксимировать полигональной характеристикой с наименьшей площадью. Однако построение области срабатывания защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП методом перебора варьируемых параметров является трудоемкой задачей. При ручном расчете параметров срабатывания достаточно найти замеры текущего сопротивления, соответствующие крайним точкам области срабатывания. Для упрощения расчета предлагается использовать однолинейную схему замещения текущего режима (при трехфазном замыкании), приведенную на рисунке 12.

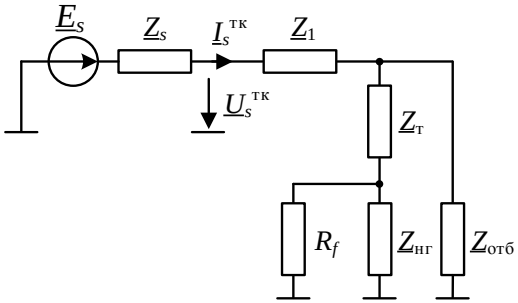

Рис. 12. Модель текущего режима

Дополнительно в процессе расчета замера сопротивления при трехфазных замыканиях необходимо найти минимальный фазный ток замыкания. В перечень параметров срабатывания защиты дальнего резервирования ток задается во вторичных величинах с учетом коэффициента запаса. Коэффициент запаса выбирается из диапазона от 0,7 до 1, по умолчанию равен 0,7.

Группа точек комплексной плоскости, ограничивающая характеристику срабатывания реле сопротивления сверху, получена при расчете замера сопротивления в схеме замещения текущего режима, составленной для режима 1:

- минимальный режим работы питающей системы «за спиной»;
- максимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора;
- режим холостого хода ответвительных трансформаторов.

Расчет параметров режима 1 необходимо выполнить с минимальным и максимальным переходным сопротивлением в месте повреждения. В этом режиме работы при трехфазном замыкании с максимальным переходным сопротивлением в месте повреждения необходимо найти минимальный фазный ток замыкания.

Группа точек комплексной плоскости, ограничивающая характеристику срабатывания реле сопротивления снизу (режим 2):

- минимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора с учетом зоны резервирования внутренних замыканий в трансформаторе;
- максимальная загрузка всех трансформаторов, входящих в зону резервирования.

Расчет параметров режима 2 необходимо выполнить при минимальном переходном сопротивлении в месте повреждения, а также при значениях сопротивления защищаемого трансформатора, соответствующих крайним положениям РПН.

В зависимости от мощности и загрузки защищаемых трансформаторов характеристика срабатывания реле сопротивления может ограничиваться справа как точками замеров группы 1, так и точками группы 2.

Характеристика срабатывания реле сопротивления при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП приведена на рисунке 13. При ее построении закладывается коэффициент запаса по величине сопротивления (расширение границ сверху и снизу на 10%).

Граница слева (*AD*) строится на луче *OD*, выходящем из точки начала координат. Угол $\varphi_2 = 95°$.

Угол наклона нижней границы характеристики φ_1 для удобства ручного расчета принят равным 15°.

Граница справа откладывается под углом φ_3, равным 85°.

Создается три типа характеристик: область замеров реле сопротивления при трехфазном КЗ, область замеров реле сопротивления при междуфазном КЗ (для схемы соединения обмоток «звезда-треугольник», 11 группы соединения) и область замеров реле сопротивления при междуфазном КЗ (для схемы соединения обмоток «звезда-звезда», 12 группы соединения). В логике защиты заложено разделение расчета замера реле сопротивления: если обмотки резервируемого трансформатора соединены по схеме Y/D-11, при междуфазном замыкании используется фазный замер, а при схеме соединения Y/Y-12 – междуфазный.

При отсутствии на линии трехобмоточных трансформаторов уставочная область для междуфазных замеров сопротивления при междуфазных замыканиях на стороне среднего напряжения не рассчитывается.

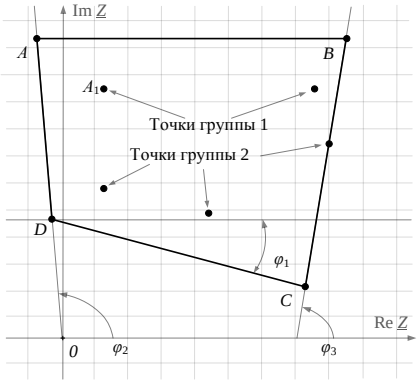

Рис. 13. Характеристика срабатывания реле сопротивления при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП

3. Программа расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования ZDR

Для облегчения расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования специалистами ООО «НПП Бреслер» разработана программа ZDR.

Программа позволяет рассчитать параметры срабатывания защиты дальнего резервирования производства ООО «НПП Бреслер», имея данные по имитационной модели участка энергосистемы.

Для начала работы с программой ZDR необходимо запустить файл ZDR.exe. При запуске по умолчанию открывается окно для задания параметров имитационной модели линии с односторонним питанием. Для выбора типа рассматриваемой линии следует выбрать **Тип линии** в Главном меню программы (см. рисунок 14). Возможен выбор трех типов рассматриваемого объекта: линия с односторонним питанием, линия с двухсторонним питанием и линия с обходной связью. В соответствии с выбранным пунктом меню меняется изображение в основном окне программы.

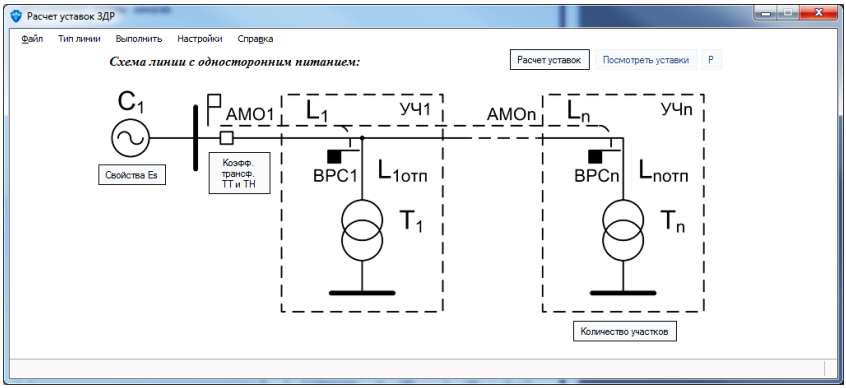

Рис. 14. Начальное окно программы ZDR

Далее следует выбрать **Количество участков**: участком в программе именуется объект энергосистемы, включающий в себя отрезок линии электропередачи (эквивалентируется комплексным сопротивлением) и ответвление (см. рисунок 15).

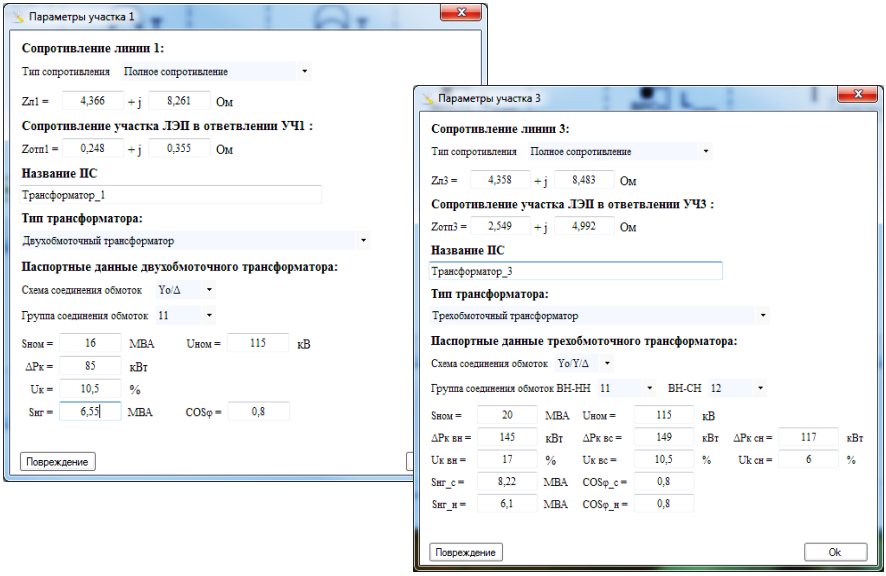

Рис. 15. Меню выбора параметров участка

Модель, создаваемая в программе ZDR, также требует определения параметров эквивалентных питающих систем: ввод этих данных производится

в дополнительных окнах, вызываемых нажатием кнопки **Свойства Es** и **Свойства Er** (см. рисунок 16).

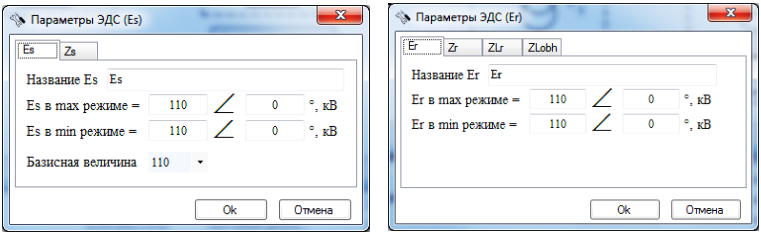

Рис. 16. Окна задания параметров эквивалентных систем

При задании параметров эквивалентной системы «за спиной» **Es** и на противоположном конце линии **Er** нужно запонить поля для данных о величинах напряжения и сопротивления системы в минимальном и максимальном режимах.

Окно **Параметры ЭДС (Es)** содержит поле «Базисная величина», в котором нужно выбрать ступень напряжения, величина которой будет использоваться как базис при внутренних расчетах приложения.

Окно **Параметры ЭДС (Er)** содержит вкладки **ZLr** – поле для ввода информации о сопротивлении между последним ответвлением и шинами системы Er, и **ZLobh –** поле для ввода информации об обходной связи в минимальном и масимальном режимах (в случае, если рассмаривается объект «Линия с обходной связью»).

Также следует заполнить поля в окне **Коэфф. трансф. ТТ и ТН**, предназначенные для ввода коэффициентов трансформации трансформатора тока и напряжения.

После заполнения всех перечисленных полей необходимо нажать на кнопку **Расчет уставок**, после чего активируется кнопка **Посмотреть уставки**. В появившемся окне имеется три вкладки: **Виртуальное реле**, **Реле сопротивления АПВ**, **Дополнительные уставки**.

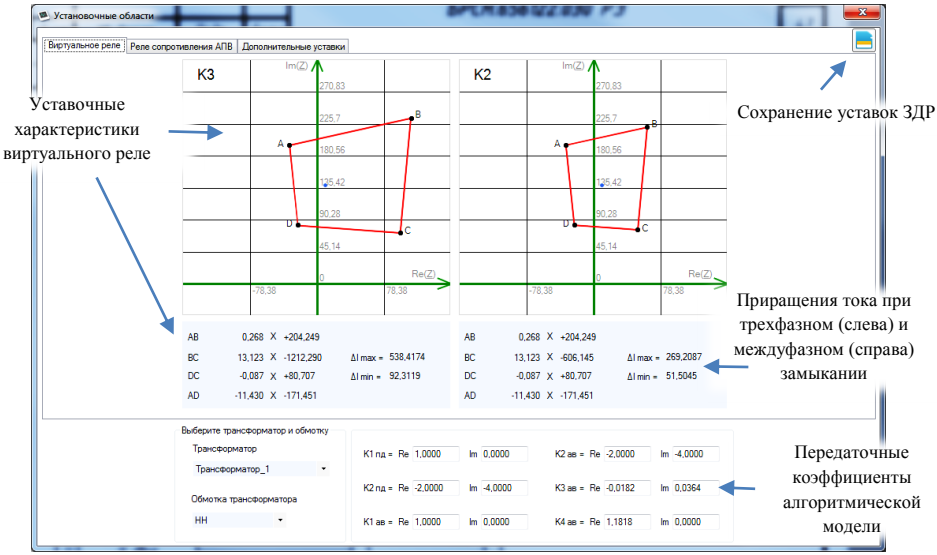

Рис. 17. Окно просмотра рассчитанных параметров срабатывания ЗДР

Программа для расчета параметров срабатывания защиты дальнего резервирования генерирует файл специализированного формата «.ZDR», используемый при формировании файла уставок, а также позволяет сохранить результаты расчета в текстовом формате.

4. Параметры срабатывания пусковых и блокирующих органов

Параметр срабатывания измерительного органа **dI1**, контролирующего уровень приращения тока прямой последовательности, принимается равным минимальному приращению тока прямой последовательности при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения защищаемых ответвительных подстанций. Параметр равен минимальной величине из диапазонов приращений тока прямой последовательности, рассчитанных для каждого ВРС.

Параметр срабатывания измерительного органа **dI2**, контролирующего уровень приращения тока обратной последовательности, принимается равным минимальному приращению тока обратной последовательности при междуфазном замыкании на стороне низшего напряжения защищаемых ответвительных подстанций. Параметр равен минимальной величине из

диапазонов приращений тока обратной последовательности, рассчитанных для каждого ВРС.

Параметр срабатывания измерительного органа **kdI1**, контролирующего уровень приращения тока прямой последовательности, принимается равным минимальному приращению тока прямой последовательности при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения защищаемых ответвительных подстанций (ИО **dI1**), умноженному на 0,85.

Параметр срабатывания измерительного органа **kdI2**, контролирующего уровень приращения тока обратной последовательности, принимается равным минимальному приращению тока обратной последовательности при междуфазном замыкании на стороне низшего напряжения защищаемых ответвительных подстанций (ИО **dI2**), умноженному на 0,85.

Параметр срабатывания измерительного органа **Re(S1ав)**, контролирующего величину мощности собственно аварийного режима, необходимо отстраивать только от тока небаланса прямой последовательности:

$$S_{1\text{ав}}^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}} \cdot k_{\text{отс}} \cdot I_{1\text{нб}} \ ,$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$k_{\text{отс}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коэффициент отстройки;

$I_{1\text{нб}}$ – ток небаланса прямой последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03) \cdot I_{\text{макс.раб.}}$, $I_{\text{макс.раб.}}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **Re(dS1)**, контролирующего приращение реактивной мощности, необходимо отстраивать только от тока небаланса прямой последовательности:

$$\Delta S_1^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}} \cdot k_{\text{отс}} \cdot I_{1\text{нб}} \ ,$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{1\text{нб}}$ – ток небаланса прямой последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03) \cdot I_{\text{макс.раб.}}$, $I_{\text{макс.раб.}}$ – максимальный рабочий ток, в случае

отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **I2**, контролирующего уровень тока обратной последовательности принимается равным параметру срабатывания измерительного органа **dI2**; должен быть отстроен от несимметрии, вызванной наличием тяговой нагрузки, с учетом небаланса:

$$I_2^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}} \cdot k_{\text{отс}} \cdot \left(I_{2\text{несим}} + I_{2\text{нб}}\right),$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{2\text{несим}}$ – ток несимметрии обратной последовательности, обусловленный наличием тяговой нагрузки, неполной транспозицией и несимметрией линии.

$I_{2\text{нб}}$ – ток небаланса обратной последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03)I_{\text{макс.раб.}}$, $I_{\text{макс.раб.}}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **I0_блок**, контролирующего уровень тока нулевой последовательности, отстраивается от измерительного органа **dI2**. Коэффициент запаса выбирается из диапазона от 0,5 о.е. до 1 о.е., значение по умолчанию 0,5 о.е.

Необходимо проверить параметр срабатывания по условию отстройки от небаланса, вызванного погрешностью трансформаторов тока, и несимметрией линии:

$$I_0^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}} k_{\text{отс}} \left(I_{0\text{нб}} + I_{0\text{несим}}\right),$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{0\text{нб}}$ – ток небаланса нулевой последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03)I_{\text{макс.раб.}}$, $I_{\text{макс.раб.}}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока;

$I_{0\text{несим}}$ – ток несимметрии нулевой последовательности, обусловленный неполной транспозицией и несимметрией линии, в предварительных расчетах принимается равным нулю.

Параметр срабатывания измерительного органа **I1_мин**, контролирующего уровень тока прямой последовательности, принимается равным току точной работы $(0{,}02 \div 0{,}03)I_{\text{ном}}$ А, где $I_{\text{ном}}$ - номинальный вторичный ток (1 А или 5 А); по умолчанию 0,03 $I_{\text{ном}}$.

Параметр срабатывания измерительного органа **I1_БТН**, контролирующего уровень тока прямой последовательности, выбирается из условия:

$$I_{1\text{БТН}}^{\text{уст}} \geq (1 \div 3)I_{\text{ном}},$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **I1_2h/I1_БТН**, контролирующего отношение второй гармоники к основной в токе прямой последовательности, выбирается из диапазона от 0,1 о.е. до 0,2 о.е., значение по умолчанию 0,15 о.е.

Параметр срабатывания измерительного органа **U2_БНН**, контролирующего уровень напряжения обратной последовательности, отстраивается от напряжения небаланса и напряжения несимметрии по обратной последовательности:

$$U_{2\,\text{БНН}}^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}}\, k_{\text{отс}} \left(U_{2\text{нб}} + U_{2\text{несим}}\right),$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$U_{2\text{нб}}$ – напряжение небаланса обратной последовательности, принимается равным $(0{,}01 \div 0{,}02)U_{\text{ном}}$;

$U_{2\text{несим}}$ – напряжение несимметрии обратной последовательности, обусловленное наличием тяговой нагрузки и неполной транспозиции линии, в предварительных расчетах принимается равным нулю.

Полученный параметр срабатывания должен быть не более 15 В (см. Примечание 1).

Параметр срабатывания измерительного органа **I2_БНН**, контролирующего уровень тока обратной последовательности, отстраивается от небаланса, вызванного погрешностью трансформаторов тока, и несимметрии, вызванной наличием тяговой нагрузки:

$$I_{2\,\text{БНН}}^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}}\, k_{\text{отс}} \left(I_{2\text{нб}} + I_{2\text{несим}}\right),$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{2нб}$ – ток небаланса обратной последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03)I_{макс.раб.}$, $I_{макс.раб.}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока;

$I_{2несим}$ – ток несимметрии обратной последовательности, обусловленный наличием тяговой нагрузки, неполной транспозицией и несимметрией линии, в предварительных расчетах принимается равным нулю.

Параметр срабатывания измерительного органа **U1_БНН**, контролирующего уровень напряжения прямой последовательности, отстраивается от минимального фазного рабочего напряжения линии, значение по умолчанию 40 В (см. Примечание 1).

Параметр срабатывания измерительного органа **I1_БНН**, контролирующего уровень тока прямой последовательности, отстраивается от максимального рабочего тока линии:

$$I_{1\,БНН}^{уст} \geq k_{отс} I_{макс.раб},$$

где $I_{макс.раб.}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **U0_3h_БНН**, контролирующего уровень третей гармоники в напряжении разомкнутого треугольника, в предварительных расчетах принимается равным $U_{0h3}^{уст} = 0{,}1\,В$.

Параметр срабатывания измерительного органа **I0_БНН**, контролирующего уровень тока нулевой последовательности, отстраивается от небаланса, вызванного погрешностью трансформаторов тока, и несимметрией линии:

$$I_{0\,нб\,БНН}^{уст} \geq k_з k_{отс}\left(I_{0нб} + I_{0несим}\right),$$

где $k_з = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{0нб}$ – ток небаланса нулевой последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03)I_{макс.раб.}$, $I_{макс.раб.}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока;

$I_{0\text{несим}}$ – ток несимметрии нулевой последовательности, обусловленный неполной транспозицией и несимметрией линии, в предварительных расчетах принимается равным нулю.

Параметр срабатывания измерительного органа **U2/U0_БНН**, принимается равным 0,1 о.е. Это обусловлено тем, что уровень напряжения обратной последовательности не может быть в 10 раз меньше уровня напряжения нулевой последовательности в нормальном и аварийном режимах работы линии.

Параметр срабатывания измерительного органа **U0_БНН**, контролирующего уровень напряжения нулевой последовательности, отстраивается от напряжения небаланса и напряжения несимметрии по нулевой последовательности:

$$U_{0\,\text{БНН}}^{\text{уст}} \geq k_{\text{з}} k_{\text{отс}} \left(U_{0\text{нб}} + U_{0\text{несим}}\right),$$

где $k_{\text{з}} = 2$ – коэффициент запаса;

$U_{0\text{нб}}$ – напряжение небаланса нулевой последовательности, принимается равным $(0{,}01 \div 0{,}02) U_{\text{ном}}$;

$U_{0\text{несим}}$ – напряжение несимметрии нулевой последовательности, обусловленное наличием неполной транспозиции и несимметрии линии, в предварительных расчетах принимается равным нулю.

Полученный параметр срабатывания должен быть не более 12 В (см. Примечание 1).

Параметр срабатывания измерительного органа **Diff(U0)_БНН**, контролирующего модуль векторной разности расчетного и физического напряжения нулевой последовательности отстраивается от небаланса. По умолчанию величину параметра следует задавать равной 25 В. Параметр срабатывания измерительного органа **I0_БНН_блок**, контролирующего уровень тока нулевой последовательности, выбирается из условия:

$$I_{0\,\text{БНН}}^{\text{уст}} \geq (3 \div 5) I_{\text{ном}},$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток трансформатора тока.

Параметр срабатывания измерительного органа **dU1_БНН**, контролирующего приращение напряжения прямой последовательности,

необходимо отстраивать только от напряжения небаланса прямой последовательности:

$$\Delta U_{1БНН}^{уст} \geq k_з k_{отс} U_{1нб},$$

где $k_з = 2$ – коэффициент запаса;

$U_{1нб}$ – напряжение небаланса прямой последовательности, принимается равным $(0{,}01 \div 0{,}02) U_{ном}$.

Параметр срабатывания измерительного органа **dI1_БНН**, контролирующего приращение тока прямой последовательности, необходимо отстраивать только от тока небаланса прямой последовательности:

$$\Delta I_{1БНН}^{уст} \geq k_з k_{отс} I_{1нб},$$

где $k_з = 2$ – коэффициент запаса;

$I_{1нб}$ – ток небаланса прямой последовательности, принимается равным $(0{,}02 \div 0{,}03) I_{мак.раб.}$, $I_{мак.раб.}$ – максимальный рабочий ток, в случае отсутствия данных принимается равным вторичному номинальному току трансформатора тока.

Параметры срабатывания измерительных органов **Ia**, **Ib**, **Ic** выбирается равными минимальному току трехфазного замыкания при отключенной системе с противоположного конца (отключен выключатель в схеме с двухсторонним питанием).

<u>Примечание 1</u>

Величины срабатывания измерительных органов по напряжению задаются в относительных единицах от базисного напряжения:

$$U_{ср} = \frac{U_{втор}}{U_{ном\,т}},$$

где $U_{ср}$ – искомая величина напряжения (напряжение срабатывания измерительного органа), о.е.;

$U_{втор}$ – величина напряжения во вторичных величинах, В;

$U_{ном\,т}$ – номинальное напряжение, задаваемое в файле настроек ЗДР (эта величина является базисом для расчетов, производимых непосредственно устройством, и не влияет на расчет параметров срабатывания защиты,

приведенный в разделе 4). Величину номинального напряжения $U_{\text{ном т}}$ в файле настроек следует выбирать исходя из номинального напряжения вторичных цепей ТН; по умолчанию величина $U_{\text{ном т}}$ составляет 100 В.

<u>Примечание 2</u>

Параметры срабатывания токовых измерительных органов задаются в относительных единицах от базисного тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{втор}}}{I_{\text{ном т}}},$$

где $I_{\text{ср}}$ – искомая величина тока (ток срабатывания измерительного органа), о.е.;

$I_{\text{втор}}$ – величина тока во вторичных величинах, А;

$I_{\text{ном т}}$ – номинальный ток, задаваемый в файле настроек ЗДР (эта величина является базисом для расчетов, производимых непосредственно устройством, и не влияет на расчет параметров срабатывания защиты, приведенный в разделе 4). Значение $I_{\text{ном т}}$ выбирается равным по величине номинальному вторичному току ТТ защищаемой линии (1 А или 5 А).

5. Таймеры ЗДР

Таймер **Тср_Сраб**, определяющий выдержку времени на срабатывание защиты с действием на реле, выбирается из условия отстройки от времени срабатывания третьей ступени дистанционной защиты:

$$T_{\text{сраб}} \geq T_{\text{ср_3ст_ДЗ}} + \Delta t,$$

где $T_{\text{ср_3ст_ДЗ}}$ – время срабатывания 3 ступени дистанционной защиты;

Δt – ступень селективности, принимается равной 0,5 с.

Величина срабатывания таймера **Тср_Сраб2**, определяющего выдержку времени на срабатывание защиты с действием на реле, выбирается из условия отстройки от времени срабатывания третьей ступени дистанционной защиты:

$$T_{\text{сраб}} \geq T_{\text{ср_3ст_ДЗ}} + \Delta t,$$

где $T_{ср_3ст_ДЗ}$ – время срабатывания 3 ступени дистанционной защиты;

Δt – ступень селективности, принимается равной 0,5 с.

Таймер **Тср_УРОВ**, определяющий выдержку времени на срабатывание логики УРОВ, выбирается равной величине параметра **Тср_Сраб.**

Величина срабатывания таймера **Тср_АПВ**, определяющего выдержку времени на срабатывание логики запрета АПВ, выбирается равной величине параметра **Тср_Сраб.**

Параметры **Тср_ВЧТО** и **Тср_ВЧТО2** определяют выдержку времени на формирование сигнала пуска высокочастотного телеотключения.

Перечисленные таймеры задаются в секундах.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Пример расчета защиты дальнего резервирования

Ниже приведен расчет параметров срабатывания защиты дальнего резервирования на примере линии с двусторонним питанием и обходной связью, показанной на рисунке А.1.

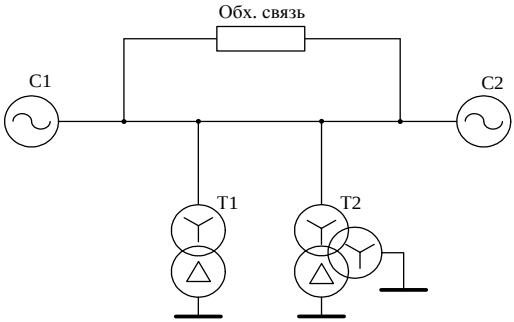

Рис. А.1. Схема линии с двусторонним питанием и обходной связью

Расчет параметров срабатывания ЗДР, установленной на линии без обходной связи, производится аналогичным образом.

- Исходные данные для расчета параметров срабатывания ЗДР

Для построения схемы замещения линии (рисунок А.2) необходимы следующие данные:

- величины эквивалентных ЭДС питающих систем «за спиной» и с противоположного конца ЛЭП соответственно $\underline{E}_s = 110/\sqrt{3}\angle 0°$ кВ, $\underline{E}_r = 110/\sqrt{3}\angle 0°$ кВ;

- эквивалентное сопротивление системы «за спиной» в максимальном и минимальном режиме $\underline{Z}_s^{\text{макс}} = 5 + j20$ Ом, $\underline{Z}_s^{\text{мин}} = 10 + j40$ Ом;

- эквивалентное сопротивление системы с противоположного конца линии в максимальном и минимальном режиме $\underline{Z}_r^{\text{макс}} = 10 + j20$ Ом, $\underline{Z}_r^{\text{мин}} = 20 + j50$ Ом;

- эквивалентное сопротивление участков линии $\underline{Z}_{\text{л}1} = \underline{Z}_{\text{л}2} = \underline{Z}_{\text{л}3} = 4{,}5 + j6$ Ом;

- эквивалентное сопротивление обходной связи $\underline{Z}_{\text{обх}} = 10 + j50$ Ом;

- эквивалентное сопротивление участка ЛЭП в ответвлении Т1 $\underline{Z}_{\text{отп1}} = 1{,}5 + j2$ Ом;

- паспортные данные трансформатора Т1: $S_{\text{ном т1}} = 6{,}3$ МВА, $U_{\text{к т1}} = 10{,}5$ %, $P_{\text{к т1}} = 22$ кВт – и рассчитанное по ним эквивалентное сопротивление $\underline{Z}_{\text{т1}} = 7{,}33 + j220{,}42$ Ом;

- паспортные данные трансформатора Т2: $S_{\text{ном т2}} = 16$ МВА, $U_{\text{к т2}}^{\text{вн–сн}} = 10{,}5$ %, $U_{\text{к т2}}^{\text{вн–нн}} = 17$ %, $U_{\text{к т2}}^{\text{сн–нн}} = 6$ %, $P_{\text{к т2}}^{\text{вн–сн}} = 83$ кВт, $P_{\text{к т2}}^{\text{вн–нн}} = 78$ кВт, $P_{\text{к т2}}^{\text{сн–нн}} = 58$ кВт – и рассчитанные по ним эквивалентные сопротивления ветвей его схемы замещения («трехлучевой звезды»): $\underline{Z}_{\text{т2}}^{\text{вн}} = 2{,}66 + j88{,}86$ Ом, $\underline{Z}_{\text{т2}}^{\text{сн}} = 1{,}63$ Ом, $\underline{Z}_{\text{т2}}^{\text{нн}} = 1{,}37 + j51{,}66$ Ом;

- максимальный коэффициент загрузки трансформаторов $k_{\text{з т1}} = k_{\text{з т2}} = 0{,}5$;

- коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения $k_{\text{тн}} = 1100$, $k_{\text{нн}} = 80$.

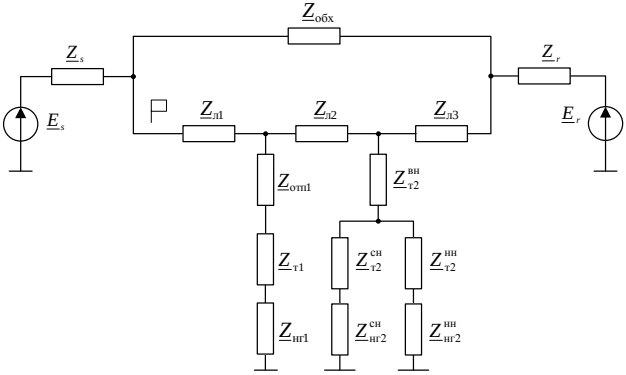

Рис. А.2. Схема замещения линии с двусторонним питанием и обходной связью

<u>Примечание 3</u>

При наличии на трансформаторе устройства РПН в расчете параметров срабатывания защит необходимо учитывать возможное изменение сопротивления трансформатора. Для этого следует пересчитать этот параметр при крайних положениях переключателя. Однако следует

принять во внимание, что отклонение от номинального напряжения сетей нормируется и составляет 10%. Расчет максимального и минимального сопротивления трансформатора производится по следующей формуле:

$$X_{\text{т}}^{\max} = \frac{U_{\text{к}}^{\max}\%}{100} \cdot \frac{\left(U_{\text{т}}^{\max}\right)^2}{S_{\text{т}}} = \frac{U_{\text{к}}^{\max}\%}{100} \cdot \frac{(126)^2}{S_{\text{т}}};$$

$$X_{\text{т}}^{\min} = \frac{U_{\text{к}}^{\min}\%}{100} \cdot \frac{\left(U_{\text{т}}^{\min}\right)^2}{S_{\text{т}}} = \frac{U_{\text{к}}^{\min}\%}{100} \cdot \frac{\left(U_{\text{ном}} \cdot \left(1 - \Delta U_{*\text{РПН}}\right)\right)^2}{S_{\text{т}}},$$

где $U_{\text{к}}^{\max}\%$ - напряжение короткого замыкания при «максимальной» ступени регулирования;

$U_{\text{к}}^{\min}\%$ - напряжение короткого замыкания при «минимальной» ступени регулирования;

$U_{\text{т}}^{\max} = 1{,}1 \cdot U_{\text{ном}} = 126$ кВ - максимальное допустимое напряжение;

$U_{\text{т}}^{\min}$ - напряжение при «минимальной» ступени регулирования;

$$U_{\text{т}}^{\min} = U_{\text{ном}} \cdot \left(1 - \Delta U_{*\text{РПН}}\right),$$

где $\Delta U_{*\text{РПН}}$ - половина диапазона регулирования, в сетях 110 кВ наиболее распространены трансформаторы с диапазоном регулирования ±16% (±9 ступеней), поэтому в приведенной методике принимаем $U_{\text{т}}^{\min} = 96{,}6$ кВ.

Для имеющихся в схеме трансформаторов рассчитаны минимальные и максимальные сопротивления:

$$X_{\text{т}1}^{\text{макс}} = 295{,}34 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}1}^{\text{мин}} = 156{,}71 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}2}^{\text{вн макс}} = 115{,}85 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}2}^{\text{вн мин}} = 60{,}51 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}2}^{\text{нн макс}} = 51{,}66 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{т}2}^{\text{нн мин}} = 39{,}46 \text{ Ом}.$$

В дальнейших расчетах используются коэффициенты $k_{\text{РПН}}^{\text{макс}}$ и $k_{\text{РПН}}^{\text{мин}}$, равные отношениям:

$$k_{\text{РПН_т}\,N}^{\text{макс}} = \frac{X_{\text{т}N}^{\text{макс}}}{X_{\text{т}N}^{\text{ном}}}, \quad k_{\text{РПН_т}\,N}^{\text{мин}} = \frac{X_{\text{т}N}^{\text{мин}}}{X_{\text{т}N}^{\text{ном}}},$$

где $X_{\text{т}N}^{\text{ном}}$ – сопротивление N-ого трансформатора, рассчитанное при номинальных данных.

В случае, когда данные об устройстве РПН недоступны, в ручном расчете допустимо принять диапазон изменения сопротивления трансформатора равным $0{,}7 \div 1{,}3$ величины его сопротивления, рассчитанного при номинальных параметрах.

<u>Примечание 4</u>

Кроме того, следует задаться величиной желаемой зоны резервирования. Эта величина выражается коэффициентом $k_{зр}$. Иными словами, если зона резервирования ограничивается шинами низшего напряжения трансформатора, то величина $k_{зр}$ выбирается равной единице; если необходимо резервировать не только шины НН, но и сам трансформатор от внутренних замыканий, то величина $k_{зр}$ выбирается меньше единицы.

Необходимо осуществить пересчет параметров схемы замещения с целью упрощения конфигурации (рисунок А.3, переход от схемы (а) к схеме (б) и (в)):

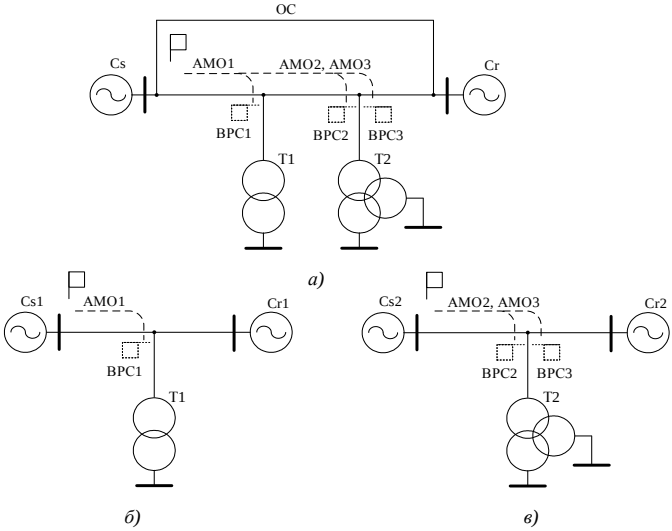

Рис. А.3. Схемы участка сети

а) исходная (с обходной связью);

б) упрощенная (составленная для расчета параметров АМО1);

в) упрощенная (составленная для расчета параметров АМО2 и АМО3)

Для перехода от схемы с обходной связью к схеме одиночной линии, как показано на рисунке А.3, необходимо пересчитать значения сопротивлений питающих систем по формулам (1). Рассчитываются диапазоны изменения эквивалентных сопротивлений систем с противоположного конца ЛЭП и «за спиной». Для АМО1 значения сопротивлений питающих систем в максимальном режиме равны:

$$\underline{Z}_{r1}^{\text{макс}} = \underline{Z}_{r}^{\text{макс}} \cdot \frac{\underline{Z}_{s}^{\text{макс}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{s}^{\text{макс}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_1 \cdot \left(\underline{Z}_{r}^{\text{макс}} + \underline{Z}_3\right)} = 10{,}9028 + j21{,}7476 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{s1}^{\text{макс}} = \underline{Z}_{s}^{\text{макс}} \cdot \frac{\underline{Z}_{r}^{\text{макс}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{r}^{\text{макс}} \cdot \left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_2 \cdot \left(\underline{Z}_{s}^{\text{макс}} + \underline{Z}_3\right)} = 4{,}8926 + j18{,}7781 \text{ Ом},$$

где $\underline{Z}_r^{\text{макс}} = 10 + j20$ Ом, $\underline{Z}_s^{\text{макс}} = 5 + j20$ Ом – эквивалентные сопротивления питающих систем в исходной схеме, взятые в максимальном режиме;

$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{л}1} = 4{,}5 + j6$ Ом, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\text{л}3} = 9 + j12$ Ом – сопротивления участков линии;

$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{\text{обх}}^{\text{макс}} = 10 + j50$ Ом – сопротивление обходной связи.

Эквивалентные сопротивления питающих систем в минимальном режиме, рассчитанные для АМО1, равны:

$$\underline{Z}_{r1}^{\text{мин}} = \underline{Z}_{r}^{\text{мин}} \cdot \frac{\underline{Z}_{s}^{\text{мин}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{s}^{\text{мин}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_1 \cdot \left(\underline{Z}_{r}^{\text{мин}} + \underline{Z}_3\right)} = 21{,}5842 + j53{,}5562 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{s1}^{\text{мин}} = \underline{Z}_{s}^{\text{мин}} \cdot \frac{\underline{Z}_{r}^{\text{мин}} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_{r}^{\text{мин}} \cdot \left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3\right) + \underline{Z}_2 \cdot \left(\underline{Z}_{s}^{\text{мин}} + \underline{Z}_3\right)} = 9{,}6988 + j38{,}1144 \text{ Ом},$$

где $\underline{Z}_r^{\text{мин}} = 20 + j50$ Ом, $\underline{Z}_s^{\text{мин}} = 10 + j40$ Ом – эквивалентные сопротивления питающих систем в исходной схеме, взятые в минимальном режиме;

$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{л}1} = 4{,}5 + j6$ Ом, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\text{л}3} = 9 + j12$ Ом – сопротивления участков линии;

$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{\text{обх}}^{\text{макс}} = 10 + j50$ Ом – сопротивление обходной связи.

При составлении АМО2 (АМО3) эквивалентные сопротивления систем пересчитываются по тем же формулам, однако следует учитывать, что $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\text{л}2} = 9 + j12$ Ом, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{\text{л}3} = 4{,}5 + j6$ Ом.

Диапазон изменения эквивалентных сопротивлений питающих систем в схеме АМО2 (АМО3):

$$\underline{Z}_{r2}^{\text{макс}} = 8{,}4863 + j19{,}1072 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{s2}^{\text{макс}} = 6{,}4800 + j21{,}5122 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{r2}^{\text{мин}} = 15{,}3283 + j45{,}4709 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{s2}^{\text{мин}} = 13{,}4270 + j44{,}2642 \text{ Ом}.$$

Таким образом, в случае необходимости учета обходной связи для каждого ответвления, входящего в зону резервирования, создается отдельная схема с собственными значениями эквивалентов сопротивлений питающих систем.

- Создание АМО. Расчет передаточных коэффициентов

Рассчитываются передаточные коэффициенты каждой из алгоритмических моделей. Стоит обратить особое внимание на то, что при необходимости учета обходной связи эквиваленты сопротивлений питающих систем различных алгоритмических моделей различаются и имеют собственные диапазоны изменения.

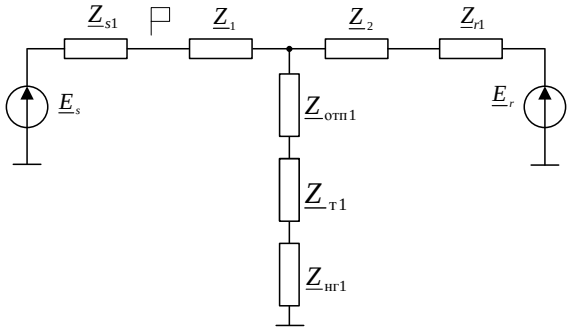

Рис. А.4. Схема замещения предшествующего режима АМО1

Для схемы одиночной линии с двухсторонним питанием (рисунок А.4) передаточные коэффициенты алгоритмической модели можно найти по формулам:

$$K_1^{\text{пд}} = 1; \qquad K_1^{\text{ав}} = 1;$$

$$K_2^{\text{пд}} = -\underline{Z}_1; \quad K_2^{\text{ав}} = -\underline{Z}_1;$$

$$K_3^{\text{ав}} = -\frac{1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r};$$

$$K_4^{\text{ав}} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r},$$

где сопротивление питающей системы с противоположного конца $\underline{Z}_r$ выбирается **наименьшим**.

Для расчета коэффициентов АМО1 выбираются следующие значения параметров схемы замещения:

$$\underline{Z}_r = \underline{Z}_{r1}^{\text{макс}} = 10{,}9028 + j21{,}7476 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{л1} = 4{,}5 + j6 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{л2} + \underline{Z}_{л3} = 9 + j12 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{обх} = 10 + j50 \text{ Ом}.$$

Значения передаточных коэффициентов АМО1:

$$K_1^{пд} = 1; \qquad K_1^{ав} = 1;$$
$$K_2^{пд} = -4{,}5 - j6; \qquad K_2^{ав} = -4{,}5 - j6;$$
$$K_3^{ав} = -0{,}0130 + j0{,}0220;$$
$$K_4^{ав} = 1{,}1903 - j0{,}0211.$$

Передаточные коэффициенты АМО2 равны коэффициентам АМО3 (т.к. виртуальное реле установлено на стороне высшего напряжения трансформатора Т2) и рассчитываются при следующих параметрах схемы замещения:

$$\underline{Z}_r = \underline{Z}_{r2}^{\text{макс}} = 8{,}4863 + j19{,}1072 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{л1} + \underline{Z}_{л2} = 9 + j12 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{л3} = 4{,}5 + j6 \text{ Ом};$$
$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{обх} = 10 + j50 \text{ Ом}.$$

Значения передаточных коэффициентов АМО2 и АМО3:

$$K_1^{пд} = 1; \qquad K_1^{ав} = 1;$$
$$K_2^{пд} = -9 - j12; \qquad K_2^{ав} = -9 - j12;$$
$$K_3^{ав} = -0{,}0163 + j0{,}0314;$$
$$K_4^{ав} = 1{,}5233 - j0{,}0878.$$

- Области срабатывания ВРС

Строится характеристика срабатывания ВРС при трехфазном и междуфазном коротком замыкании (рисунок А.5) для каждой

алгоритмической модели. Построение характеристики для АМО1 начинается с нанесения на комплексную плоскость точки $\underline{Z}_{зам}$, соответствующей величине сопротивления от места установки виртуального реле до места короткого замыкания $\underline{Z}_{зам} = \underline{Z}_{отп} + \underline{Z}_{т}$; через эту точку проводится луч, выходящий из начала координат $O\underline{Z}_{зам}$.

Координаты точки *A*, через которую проводится прямая, ограничивающая область срабатывания сверху, находятся следующим образом:

$$\underline{A} = \left(\underline{Z}_{т} \cdot k_{РПН}^{макс} + \underline{Z}_{отп}\right) \cdot k_{нг} \cdot k_{зап}^{макс},$$

где $k_{РПН}^{макс} = 1{,}3$ – коэффициент, отражающий увеличение сопротивления трансформатора в крайнем положении РПН;

$k_{нг} = 1{,}05$ – коэффициент, учитывающий влияние отбора мощности на линии на замер ВРС;

$k_{зап}^{макс} = 1{,}1$ – коэффициент запаса по верхней границе.

Таким образом, координаты точки

$$\underline{A} = \left((7{,}33 + j220{,}42) \cdot 1{,}3 + (1{,}5 + j2)\right) \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}1 = 12{,}74 + j333{,}27.$$

Область срабатывания ВРС АМО1 снизу ограничивается прямой, проходящей через точку *D*, координаты которой вычисляются следующим образом:

$$\underline{D} = \left(\underline{Z}_{т} \cdot k_{РПН}^{мин} \cdot k_{зр} + \underline{Z}_{отп}\right) \cdot k_{нес_АМО} \cdot k_{зап}^{мин},$$

где $k_{РПН}^{мин} = 0{,}7$ – коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления трансформатора при крайнем положении РПН;

$k_{зр} = 1$ – коэффициент, учитывающий желаемую зону резервирования при внутренних замыканиях в ответвительном трансформаторе, этот коэффициент равен единице, поскольку в примере принято, что резервируются только замыкания на шинах НН и СН трансформаторов;

$k_{зап}^{мин} = 0{,}9$ – коэффициент запаса по нижней границе;

$k_{нес_АМО} = 0{,}75$ – коэффициент, отражающий степень несоответствия алгоритмической модели имитационной; рассчитывается по формуле

$$\underline{k}_{\text{нес_АМО}} = \frac{\left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r^{\text{АМО}}\right)\cdot\left(\underline{Z}_s + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r\right)}{\left(\underline{Z}_s + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_r^{\text{АМО}}\right)\cdot\left(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_r\right)} = 0{,}75 - j0{,}05\,.$$

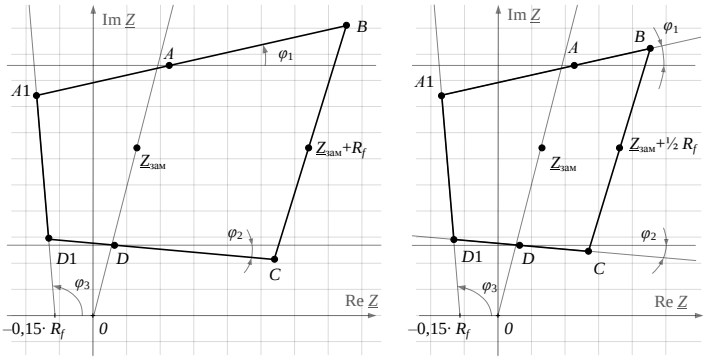

Рис. А.5. Характеристики срабатывания ВРС

В расчете коэффициента несоответствия используются величины:

$\underline{Z}_s$, $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_r$ – параметры схемы замещения модели; для трансформатора Т1 значения параметров:

$$\underline{Z}_r^{\text{АМО}} = \underline{Z}_{r1}^{\text{макс}} = 10{,}9028 + j21{,}7476 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_{s1}^{\text{мин}} = 9{,}6988 + j38{,}1144 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_r = \underline{Z}_{r1}^{\text{мин}} = 21{,}5842 + j53{,}5562 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{л}1} = 4{,}5 + j6 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\text{л}3} = 9 + j12 \text{ Ом}.$$

Таким образом, координаты точки D

$$\underline{D} = \left((7{,}33 + j220{,}42)\cdot 0{,}7\cdot 1 + (1{,}5 + j2)\right)\cdot 0{,}75\cdot 0{,}9 = 4{,}50 + j106{,}17$$

Найдя координаты точек A и D, можно построить уравнения прямых, ограничивающих область срабатывания виртуального реле. Указанные прямые описываются уравнениями вида $y = ax + b$, где a – угловой коэффициент.

Прямая AB (ограничивает область сверху):

$$y = tg(\varphi_1) \cdot \left(x - \mathrm{Re}(\underline{A})\right) + \mathrm{Im}(\underline{A});$$

где $\varphi_1 = 15°$ – угол наклона прямой АВ относительно действительной оси.

Таким образом, уравнение прямой АВ имеет вид

$$y = 0{,}268 \cdot x + 329{,}852 .$$

Прямая DC (ограничивает область снизу):

$$y = -tg(\varphi_2) \cdot \left(x - \mathrm{Re}(\underline{D})\right) + \mathrm{Im}(\underline{D}),$$

где $\varphi_2 = 5°$ угол наклона прямой DC относительно действительной оси.

Таким образом, уравнение прямой DC имеет вид

$$y = -0{,}088 \cdot x + 106{,}565 .$$

Прямая ВС (ограничивает область справа):

$$y = \left(\frac{\mathrm{Im}(\underline{Z}_{\text{зам}})}{\mathrm{Re}(\underline{Z}_{\text{зам}})}\right) \cdot \left(x - \mathrm{Re}(\underline{Z}_{\text{зам}} + R_f)\right) + \mathrm{Im}(\underline{Z}_{\text{зам}} + R_f),$$

где $R_f = 100$ Ом – переходное сопротивление в месте повреждения; для построения характеристики междуфазного замыкания используется значение $1/2 R_f = 50$ Ом.

Таким образом, уравнение прямой ВС имеет вид

$$y = 25{,}187 \cdot x - 2518{,}715 .$$

Прямая A1D1 (ограничивает область слева):

$$y = tg(\varphi_3) \cdot \left(x + 0{,}15 \cdot R_f\right),$$

где $\varphi_3 = 95°$, $R_f = 100$ Ом.

Таким образом, уравнение прямой $A1D1$ имеет вид

$$y = -11{,}430 \cdot x - 171{,}451 .$$

Величины векторов и уравнения прямых, ограничивающих характеристики срабатывания ВРС2 и ВРС3 приведены в таблице А.1

Таблица А.1

	ВРС2 (АМО2)	ВРС3 (АМО3)
AB	$y = 0{,}268 \cdot x + 209{,}363$	$y = 0{,}268 \cdot x + 131{,}691$
DC	$y = -0{,}088 \cdot x + 59{,}308$	$y = -0{,}088 \cdot x + 37{,}568$
BC	$y = 34{,}872 \cdot x - 3487{,}179$	$y = 20{,}723 \cdot x - 2072{,}289$
$A1D1$	$y = -11{,}430 \cdot x - 171{,}451$	$y = -11{,}430 \cdot x - 171{,}451$

- Диапазоны приращения тока в месте установки защиты

В перечень уставок защиты дальнего резервирования входят диапазоны приращения тока в месте установки защиты. Эти параметры срабатывания рассчитываются для каждой алгоритмической модели независимо.

Для нахождения максимального приращения тока в месте установки защиты $\Delta I_{\max}$, нужно построить схему замещения собственно аварийного режима (рисунок А.6) со следующими параметрами:

- минимальное значение эквивалентного сопротивления системы «за спиной», $\underline{Z}_{s1}^{\text{макс}} = 4{,}8926 + j18{,}7781$ Ом (максимальный режим работы системы «за спиной»);

- максимальное значение эквивалентного сопротивления системы с противоположного конца линии, $\underline{Z}_{r1}^{\text{мин}} = 21{,}5842 + j53{,}5562$ Ом (минимальный режим работы системы с противоположного конца);

- минимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора, $\underline{Z}_{\text{т}1}^{\text{мин}} = 5{,}13 + j154{,}29$ Ом ;

- холостой ход всех трансформаторов;

- минимальное переходное сопротивление в месте повреждения, $R_f^{\text{мин}} = 0$.

Величина напряжения в месте замыкания $\underline{E}_f^{\text{ав}}$ для расчета максимального приращения выбирается равной максимально допустимой величине напряжения в узле $1{,}1 \cdot E = 121\text{кВ}$, приведенной к ступени высшего напряжения.

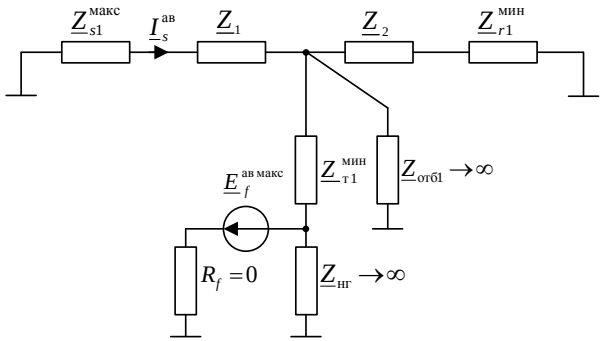

Рисунок А.6. Максимальная схема собственно аварийного режима

Ток собственно аварийного режима в месте наблюдения при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения трансформатора Т1 (ток прямой последовательности) равен

$$I_{s1}^{ав К(3)} = 296{,}15 \text{ А}.$$

Максимальное приращение тока обратной последовательности, равное току при междуфазном КЗ в составленной схеме собственно аварийного режима, по правилу эквивалентности прямой последовательности в два раза меньше рассчитанного тока при трехфазном замыкании. Таким образом, максимальное приращение тока обратной последовательности в месте наблюдения при К$^{(2)}$ на стороне низшего напряжения трансформатора Т1 равно

$$I_{s1}^{ав К(2)} = 148{,}08 \text{ А}.$$

С учетом коэффициента запаса, равного 1,1:

$$\Delta I_{max1} = 296{,}15 \cdot 1{,}1 = 325{,}77;$$

$$\Delta I_{max2} = 148{,}08 \cdot 1{,}1 = 162{,}88.$$

Для нахождения минимального приращения тока в месте установки защиты ΔI_{min} АМО1 нужно построить схему замещения сети со следующими параметрами:

- максимальное значение эквивалентного сопротивления системы «за спиной», $\underline{Z}_{s1}^{мин} = 9{,}6988 + j38{,}1144$ Ом (минимальный режим работы системы «за спиной»);

- минимальное значение эквивалентного сопротивления системы с противоположного конца линии, $\underline{Z}_{r1}^{макс} = 10{,}9028 + j21{,}7476$ Ом (максимальный режим работы системы с противоположного конца);

- максимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора, $\underline{Z}_{т1}^{макс} = 9{,}53 + j286{,}54$ Ом;

- максимальная загрузка трансформаторов (для ручного расчета в схеме замещения отпайки, входящие в зону резервирования, эквивалентируются сопротивлением $\underline{Z}_{отб}$, включенным в схему замещения собственно аварийного режима параллельно ответвлению с защищаемым трансформатором); для упрощения расчета $\underline{Z}_{отб}$ формируется сопротивлениями нагрузок трансформаторов; в составленной схеме при коэффициенте загрузки трансформатора Т2, равном $0{,}5$, сопротивление отбора $\underline{Z}_{отб} = 1210 + j907{,}5$ Ом;

- максимальное переходное сопротивление в месте повреждения, $R_f^{макс} = 100$ Ом.

Величина напряжения в месте замыкания $\underline{E}_f^{ав}$ для расчета минимального приращения выбирается равной минимально допустимой величине напряжения в узле $0{,}9 \cdot E = 99$ кВ, приведенной к ступени высшего напряжения.

Ток собственно аварийного режима в месте наблюдения при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения трансформатора Т1 (ток прямой последовательности) равен

$$I_{s1}^{ав К(3)} = 77{,}60 \text{ А}.$$

Минимальное приращение тока обратной последовательности, равное току при междуфазном КЗ в составленной схеме собственно аварийного режима, исходя из правила эквивалентности прямой последовательности, равно току в минимальной схеме собственно аварийного режима при К$^{(3)}$ с переходным сопротивлением $R_f = R_f^{макс} / 2 = 50$ Ом, уменьшенному вдвое, т.е.

$$I_{s2}^{ав К(2)}\Big|_{при\, R_f = 100} = \frac{I_{s1}^{ав К(3)}\Big|_{при\, R_f = 50}}{2}.$$

Ток собственно аварийного режима при трехфазном КЗ с переходным сопротивлением $R_f = 50$ Ом равен

$$I_{s1}^{ав К(3)}\Big|_{при\, R_f = 50} = 82{,}14 \text{ А}.$$

Минимальное приращение тока обратной последовательности, равное току собственно аварийного режима при К$^{(2)}$, имеет значение

$$I_{s2}^{ав К(2)} = 41{,}07 \text{ А}.$$

С учетом коэффициента запаса, равного 0,7:

$$\Delta I_{\min 1} = 77{,}60 \cdot 0{,}7 = 54{,}32;$$

$$\Delta I_{\min 2} = 41{,}07 \cdot 0{,}7 = 28{,}75.$$

Значения минимальных и максимальных приращений тока в месте установки защиты для АМО2 и АМО3 приведены в таблице А.2.

Таблица А.2

	АМО2 (ВРС2)	АМО3 (ВРС3)
$\Delta I_{\min 1}$	51,95	68,68
$\Delta I_{\min 2}$	29,23	41,23
$\Delta I_{\max 1}$	386,26	552,58
$\Delta I_{\max 2}$	193,13	276,29

<u>Примечание 5</u>

Для удобства расчета минимального приращения тока при коротком замыкании на стороне среднего (низшего) напряжения трехобмоточного трансформатора сопротивление нагрузки на стороне низшего (среднего) напряжения необходимо эквивалентировать сопротивлением $\underline{Z}_{\text{отб}}$. Погрешность, таким образом вносимая в расчет, учитывается коэффициентом запаса.

- Параметры срабатывания защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП

В режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП схема замещения участка сети имеет следующий вид:

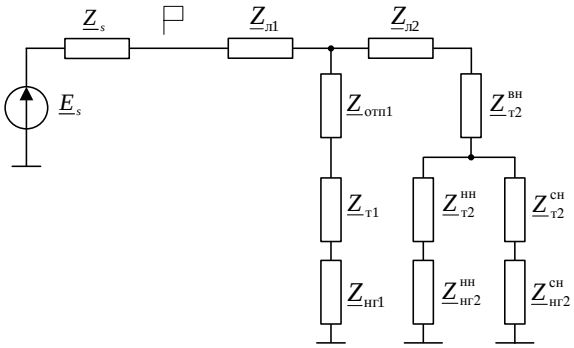

Рис. А.7. Схема замещения участка сети в режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП

Стоит обратить особое внимание на то, что в схеме замещения участка сети в режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП эквивалентное сопротивление питающей системы «за спиной» равно значению эквивалента, приведенному в исходных данных, а сама схема замещения получена из схемы А.2 путем обрыва обходной связи.

В целях упрощения ручного расчета схема замещения сопротивление участка сети приводится к виду, показанному на рисунке А.8.

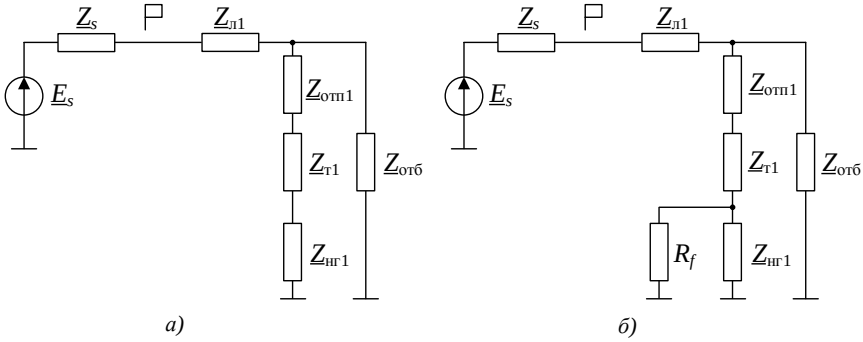

Рис. А.8. Упрощенная схема замещения АМО1 при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП
а – в предшествующем режиме
б – в текущем (аварийном) режиме

Для нахождения параметров срабатывания защиты при отключенном выключателе с противоположного конца ЛЭП необходимо рассчитать три режима работы участка энергосистемы с учетом повреждения на стороне низшего напряжения защищаемого трансформатора.

Режим 1 (режим холостого хода трансформаторов):

- минимальный режим работы питающей системы «за спиной», $0{,}9 \cdot E = 0{,}99\,\text{кВ}$;

- максимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора, $\underline{Z}_{\text{т1}}^{\text{макс}} = 9{,}53 + j286{,}54$ Ом;

- режим холостого хода ответвительных трансформаторов.

Расчет режима 1 необходимо выполнить с минимальным $R_f^{\text{мин}} = 0$ и максимальным переходным сопротивлением в месте повреждения $R_f^{\text{макс}} = 100$ Ом.

Замер сопротивления при трехфазном замыкании на стороне низшего напряжения трансформатора Т1 с учетом минимального переходного сопротивления $R_f^{\text{мин}} = 0$ равен

$$\underline{Z}^{\text{тк К(3)}} = 14{,}57 + j127{,}51 \text{ Ом}.$$

Для ручного наиболее оптимальным является расчет замера сопротивления при К(2) по комплексной схеме. По правилу эквивалентности прямой последовательности при $R_f^{\text{мин}} = 0$ найдено соотношение

$$\underline{Z}^{\text{тк К(2)}} = \underline{Z}^{\text{тк К(3)}} = 14{,}57 + j127{,}51 \text{ Ом}.$$

В режиме холостого хода замер сопротивления при трехфазном замыкании с переходным сопротивлением $R_f^{\text{макс}} = 100$ Ом равен

$$\underline{Z}^{\text{тк К(3)}}\Big|_{\text{при } R_f = 100} = \underline{Z}^{\text{тк К(3)}}\Big|_{\text{при } R_f = 0} + R_f = 114{,}57 + j127{,}51 \text{ Ом}.$$

Замер сопротивления при междуфазном замыкании с максимальным переходным сопротивлением равен замеру при трехфазном КЗ с переходным сопротивлением $R_f = 50$ Ом

$$\underline{Z}^{\text{тк К(2)}}\Big|_{\text{при } R_f = 100} = \underline{Z}^{\text{тк К(3)}}\Big|_{\text{при } R_f = 0} + R_f/2 = 64{,}57 + j127{,}51 \text{ Ом}$$

В режиме 1 (при $\underline{Z}_s = \underline{Z}_s^{\text{мин}}$, $R_f^{\text{макс}} = 100$ Ом) необходимо найти фазное значение тока в месте наблюдения для каждой алгоритмической модели и выбрать минимальное:

$$I_{\text{АМО1}}^{\text{тк К(3)}} = 161{,}04 \text{ А}, \; I_{\text{АМО 2}}^{\text{тк К(3)}} = 215{,}26 \text{ А}, \; I_{\text{АМО 3}}^{\text{тк К(3)}} = 273{,}80 \text{ А}.$$

Минимальным из них является ток $I_{\text{АМО1}}^{\text{тк К(3)}} = 161{,}04$ А. С учетом коэффициента запаса, равного 0,7, минимальный фазный ток замыкания равен

$$I^{\text{мин}} = 161{,}04 \cdot 0{,}7 = 112{,}73 \text{ А}.$$

В перечень уставок защиты дальнего резервирования входит значение минимального фазного тока замыкания при одностороннем питании ЛЭП во вторичных величинах:

$$I^{\text{мин}} = 112{,}73 / k_{\text{тт}} = 112{,}73 / 80 = 1{,}41 \text{ А}.$$

Режим 2 (режим максимальной загрузки трансформаторов):

- минимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора с учетом желаемой зоны резервирования (выражается при помощи коэффициента $k_{\text{зр}}$, который в приведенном примере равен единице), $\underline{Z}_{\text{т1}}^{\text{мин}} = 5{,}13 + j154{,}29$ Ом ;

- максимальная загрузка всех трансформаторов, входящих в зону резервирования;

- минимальное переходное сопротивление.

Замер сопротивления при трехфазном замыкании с минимальным переходным сопротивлением равен

$$\underline{Z}^{\text{тк К(3)}} = 13{,}61 + j72{,}64 \text{ Ом}.$$

При междуфазном замыкании с минимальным переходным сопротивлением замер равен

$$\underline{Z}^{\text{тк К(2)}} = \underline{Z}^{\text{тк К(3)}} = 13{,}61 + j72{,}64 \text{ Ом}.$$

Режим 3:

- максимальное значение сопротивления защищаемого трансформатора, $\underline{Z}_{\text{т1}}^{\text{макс}} = 9{,}53 + j286{,}54$ Ом ;

- максимальная загрузка всех трансформаторов, входящих в зону резервирования;

- максимальное переходное сопротивление.

Замеры реле сопротивления в режиме 3 при трехфазном и междуфазном замыканиях:

$$\underline{Z}^{\text{тк К(3)}}\Big|_{\text{при } R_f=100} = 103{,}19 + j119{,}49 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}^{\text{тк К(2)}}\Big|_{\text{при } R_f=100} = \underline{Z}^{\text{тк К(3)}}\Big|_{\text{при } R_f=50} = 63{,}46 + j119{,}32 \text{ Ом}.$$

Точки замеров реле сопротивления **всех** АМО, полученные при расчете схем трехфазного замыкания, наносятся на одну комплексную плоскость (рисунок А.9)

Нанесенные точки охватываются полигональной характеристикой *ABCD*. Прямая *AB*, ограничивающая область сверху, откладывается от верхней точки множества замеров с запасом 10% по оси ординат.

Прямая *DC*, ограничивающая область снизу, откладывается от нижней точки множества под углом $\varphi_1 = 15°$ и запасом 10% по оси ординат.

Прямая *BC*, ограничивающая область справа, откладывается точки, наиболее сильно смещенной вправо, под углом $\varphi_3 = 85°$.

Прямая *AD*, ограничивающая область слева, проходит через центр координат под углом $\varphi_2 = 95°$.

Отдельно строятся характеристики реле сопротивления при междуфазном замыкании для схем соединения обмоток трансформатора Y/D-11 и Y/Y-12, причем в первом случае в работе защиты используется фазный замер, а во втором – междуфазный.

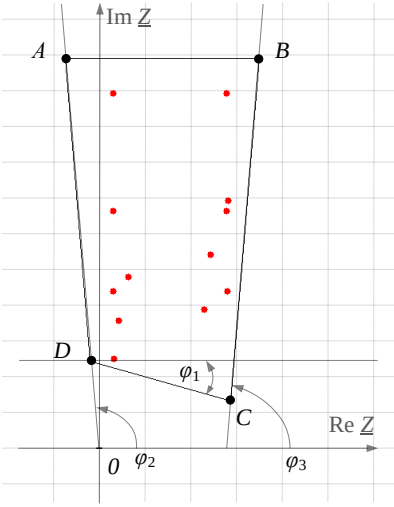

Рис. А.9. Характеристика срабатывание реле сопротивления в режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП (при $К^{(3)}$)

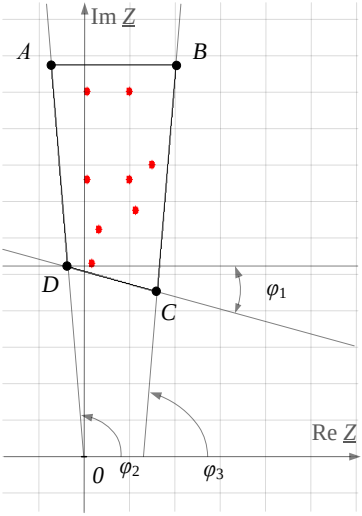

Рис. А.10. Характеристика срабатывание реле сопротивления в режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП (при $К^{(2)}$ на стороне низшего напряжения трансформаторов со схемой соединения «звезда-треугольник»)

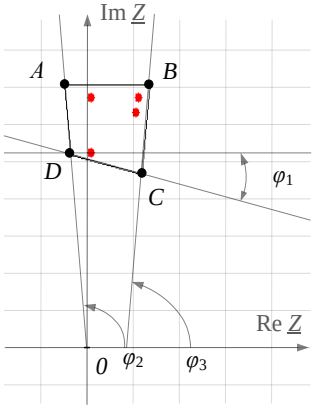

Рис. А.11. Характеристика срабатывание реле сопротивления в режиме отключения выключателя с противоположного конца ЛЭП (при К$^{(2)}$ на стороне среднего напряжения трансформатора со схемой соединения «звезда-звезда»)

В рассматриваемом примере характеристика замеров реле сопротивления при междуфазном КЗ для схемы Y/D-11 формируется точками, полученными расчетом АМО1 и АМО2; характеристика замеров реле сопротивления при междуфазном КЗ для схемы Y/Y-12 формируется точками АМО3.

Таким образом, получены уравнения прямых, формирующих характеристики срабатывания реле сопротивления в режиме отключения выключателя на противоположном конце ЛЭП:

Хар-ка К$^{(3)}$	Хар-ка К$^{(2)}$ (Y/D-11)	Хар-ка К$^{(2)}$ (Y/Y-12)
$y = 321{,}80$	$y = 321{,}80$	$y = 140{,}26$
$y = 11{,}43 \cdot x - 1309{,}59$	$y = 11{,}43 \cdot x - 950{,}27$	$y = 11{,}43 \cdot x - 738{,}09$
$y = -0{,}27 \cdot x + 68{,}66$	$y = -0{,}27x + 99{,}79$	$y = -0{,}27 \cdot x + 68{,}66$
$y = -11{,}43 \cdot x$	$y = -11{,}430 \cdot x$	$y = -11{,}430 \cdot x$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Перечень измерительных органов и таймеров защиты дальнего резервирования

Таблица Б.1 – Параметры срабатывания измерительных органов ЗДР

Обозначение	Назначение	Рекомендуемое значение, о.е.
dI1	Приращение тока прямой последовательности	(0,005÷40)
dI2	Приращение тока обратной последовательности	(0,005÷40)
kdI1	Приращение тока прямой последовательности	(0,005÷40)
kdI2	Приращение тока обратной последовательности	(0,005÷40)
Re(S1ав)	Мощность аварийных составляющих	(0,005÷40)
Re(dS1)	Приращение мощности прямой последовательности	(0,005÷40)
I2	Ток обратной последовательности	(0,005÷40)
I0_блок	Ток нулевой последовательности	(0,005÷40)
I1_мин	Ток прямой последовательности	(0,005÷40)
I1_БТН	Ток прямой последовательности	(0,005÷40)
I1_2h/I1_БТН	Отношение тока прямой последовательности второй гармоники к первой	(0,001÷10)
U2_БНН	Напряжение обратной последовательности	(0,001÷1,5)
I2_БНН	Ток обратной последовательности	(0,005÷40)
U1_БНН	Напряжение прямой последовательности	(0,001÷1,5)
I1_БНН	Ток прямой последовательности	(0,005÷40)
U0_3h_БНН	Третья гармоника разомкнутого треугольника	(0,001÷1,5)
I0_БНН	Ток нулевой последовательности	(0,005÷40)
U2/U0_БНН	Отношение напряжения обратной последовательности к нулевой	(0,001÷10)
U0_БНН	Напряжение нулевой последовательности	(0,001÷1,5)
Diff(U0)_БНН	Разность расчетного и физического 3U0	(0,001÷1,5)
I0_БНН_блок	Ток нулевой последовательности	(0,005÷40)
dU1_БНН	Приращение напряжения прямой последовательности	(0,001÷1,5)
dI1_БНН	Приращение тока прямой последовательности	(0,005÷40)
ia	Ток фазы А	(0,005÷40)
ib	Ток фазы В	(0,005÷40)
ic	Ток фазы С	(0,005÷40)

Таблица Б.2 – Параметры срабатывания таймеров ЗДР

Обозначение	**Назначение**	**Рекомендуемое значение, с**
Тср_осц	Выдержка времени на срабатывание осциллографа	0,01
Тимп_осц	Длительность импульса на реле срабатывания осциллографа	10
Тимп_осц_тест	Длительность импульса на реле срабатывания осциллографа	10
Тср_dI	Внутренний таймер	0,035
Тср_kdI	Внутренний таймер	0,027
Тср_S1ав	Внутренний таймер	0,02
Тср_dS1	Внутренний таймер	0,02
Тв_S1ав	Внутренний таймер	0,03
Тв_dS1	Внутренний таймер	0,03
Тв_К2К3	Внутренний таймер	0,04
Тср_блок2	Внутренний таймер	0,04
Тср_БТН	Внутренний таймер	0,06
Тср_I1мин	Внутренний таймер	0,09
Тв_I1мин	Внутренний таймер	0,03
Тср_БНН	Внутренний таймер	0,06
Тв_БНН	Внутренний таймер	0,02
Тв_dUdI_БНН	Выдержка времени на возврат измерительных органов dU1_БНН и dI1_БНН	1,5
Тср_БННтр	Выдержка времени на срабатывание логики БНН цепей «разомкнутого треугольника»	3
Тср_БННотк	Выдержка времени на срабатывание логики БНН с действием на реле Отказ	3
Тср_I0блок	Внутренний таймер	0,04
Тв_блок	Внутренний таймер	0,09
Тср_тк	Внутренний таймер	0,1
Тср_уст	Выдержка времени при изменении группы уставок	10
Тср_Сраб	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Работа ЗДР», «Работа ЗДР2». Уставка равна выдержке времени на срабатывание 3 ступени дистанционной защиты, увеличенной на ступень селективности	(1÷15)
Тср_Сраб2	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Работа ЗДР3».	(1÷15)
Тср_УРОВ	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Пуск УРОВ».	(1÷15)
Тср_АПВ	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Запрет АПВ».	(1÷15)

Обозначение	Назначение	Рекомендуемое значение, с
Тср_ВЧТО	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Пуск ВЧТО».	(1÷15)
Тср_ВЧТО2	Выдержка времени на срабатывание защиты, действие на реле «Пуск ВЧТО2»	(1÷15)
Тимп_Сраб	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Работа ЗДР», «Работа ЗДР2»	0,1
Тимп_Сраб2	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Работа ЗДР3»,	0,1
Тимп_УРОВ	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Пуск УРОВ»	0,1
Тимп_АПВ	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Запрет АПВ»	0,1
Тимп_ВЧТО	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Пуск ВЧТО»	0,1
Тимп_ВЧТО2	Импульсный таймер. Уставка задает минимальное время замкнутого состояния реле «Пуск ВЧТО2»	0,1
Тв_дист	Внутренний таймер	0,04
Тв_блок_дист	Внутренний таймер	0,05
Тв_I1мин_дист	Внутренний таймер	0,12
Тв_dI_дист	Внутренний таймер	0,03

Список литературы

1. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова и др.– 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004

2. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита; М.: Энергоатомиздат, 2007

3. Павлов А.О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования / Канд. диссертация, Чебоксары, Чуваш. ун-т, 2002

4. Васильев Д.С. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи/ А.О. Павлов, Д.С. Васильев; Энергетик, 2008, №12. с.5-7

Учебное пособие

Васильев Дмитрий Сергеевич

Тарасова Вера Николаевна

Рекомендации по выбору параметров срабатывания адаптивной защиты дальнего резервирования ответвительных трансформаторов линий электропередачи, реализованной на базе терминалов производства ООО «НПП Бреслер»