

# Совершенствование дистанционных защит при цифровой реализации

**Гвоздев Д.Б.,**  
Первый заместитель  
генерального директора —  
Главный инженер  
компании «Россети  
Московский регион»

**Грибков М.А.,**  
директор Департамента  
релейной защиты  
и режимной автоматики  
электрических сетей  
компании «Россети  
Московский регион»

**Булычев А.В.,**  
технический директор  
ООО «НПП Бреслер»

**Козлов В.Н.,**  
главный конструктор  
ООО «НПП Бреслер»

**Бычков Ю.В.,**  
заведующий сектором  
основных защит линий  
ООО «НПП Бреслер»

**Ш**ироко известны способы и устройства дистанционной защиты (ДЗ), в которых расстояние до места повреждения определяется с помощью реле сопротивления по косвенному принципу – изменению сопротивления контура короткого замыкания, вычисляемого по сигналам трансформаторов тока и трансформаторов напряжения [1]. Устройство защиты формирует команду на отключение линии при попадании вектора сопротивления в определенную зону (область характеристики срабатывания) на комплексной плоскости с соответствующей выдержкой времени срабатывания.

Данный подход предполагает стационарность контролируемого режима, и потому в условиях переходных процессов погрешность определения удаленности замыкания значительно возрастает.

Кроме этого, вектор измеренного сопротивления может попадать в зону срабатывания дистанционной защиты при некоторых нагрузочных режимах (например, при пуске крупного асинхронного электродвигателя) и при наличии некоторых видов переходного сопротивления в месте повреждения. Эти факторы снижают точность измерения удаленности точки короткого замыкания и, следовательно, снижают степень селективности защиты.

В период активного применения в релейной защите аналоговой вычислительной техники разработаны более совершенные методы и средства построения дистанционных защит. Предложены способы реализации дистанционных защит на основе динамического контроля параметров, при котором оценка удаленности точки короткого замыкания осуществляется по непосредственным параметрам контролируемой линии электропередачи: индуктивности, емкости и активному сопротивлению [2]. Эти

параметры достаточно строго характеризуют свойства контролируемой линии в условиях переходных процессов, что обеспечивает более высокую точность оценки удаленности точки короткого замыкания. При этом определяют зону защищаемой сети, в которой находится точка короткого замыкания, по индуктивности, емкости и активному сопротивлению в реальном (текущем) времени и формируют сигнал на отключение поврежденной линии с выдержкой времени, соответствующей удаленности точки короткого замыкания от места установки защиты.

Однако, при аналоговой реализации процесс короткого замыкания анализируется только в текущем времени, и нет возможности выполнить повторные (итерационные) вычисления удаленности точки короткого замыкания, которые позволили бы повысить точность измерений.

Важнейшей особенностью цифровой техники является способность запоминать сигналы и воспроизводить их в последующем. Применение цифровой техники целесообразно для улучшения свойств релейной защиты.

В этой связи, в рамках договора на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) между ООО «НПП Бреслер» и ПАО «Россети Московский регион» разработана новая более совершенная дистанционная защита. Улучшение основных характеристик защиты достигнуто за счет реализации на цифровой элементной базе путем регистрации процесса короткого замыкания и итерационного косвенного измерения удаленности точки короткого замыкания с помощью более точной модели контролируемой защитой линии.

По токам и напряжениям, соответствующим аварийному и нормальному (доаварийному) режимам, вычисляют аварийные составляющие, которые,

согласно принципу наложения [3], определяются, главным образом, видом и местом повреждения. Их использование позволяет отстроиться от влияния нагрузочного режима при расчете места повреждения.

На основе аварийных составляющих с помощью двух моделей защищаемой линии электропередачи определяют реактивные мощности предполагаемых (расчетных) цепей короткого замыкания при повреждении в начале и в конце защищаемой линии, соответственно. Предположив, что сопротивление в месте повреждения имеет активный (резистивный) характер, считают повреждение внутренним (на защищаемой линии), когда знаки двух полученных значений реактивной мощности различны.

На рисунке 1 показана структурная схема дистанционной защиты применительно к цифровой реализации.

Сигналы от датчиков тока и напряжения поступают в блок регистрации, который осуществляет непрерывную запись и хранение измеренных значений. При возникновении короткого замыкания в произвольной точке  $K$  линии электропередачи данный блок выявляет начало переходного процесса и на основании имеющейся информации об измеренных величинах формирует два набора значений токов и напряжений, которые соответствуют предшествующему (доаварийному)  $[U_{ГПС}^{дд} I_{ГПС}^{дд}]$  и текущему  $[U_{ГПС}^{тк} I_{ГПС}^{тк}]$  режимам работы сети. По ним вычисляются аварийные составляющие токов и напряжений:

$$U_{ГПС}^{ав} = U_{ГПС}^{тк} - U_{ГПС}^{дд}; \quad (1)$$

$$I_{ГПС}^{ав} = I_{ГПС}^{тк} - I_{ГПС}^{дд}; \quad (2)$$

Здесь же определяется вид повреждения.

Полученные наборы токов и напряжений поступают на входы блоков моделирования короткого замыкания. Они осуществляют математический пересчет наблюдаемых величин в ток ветви повреж-

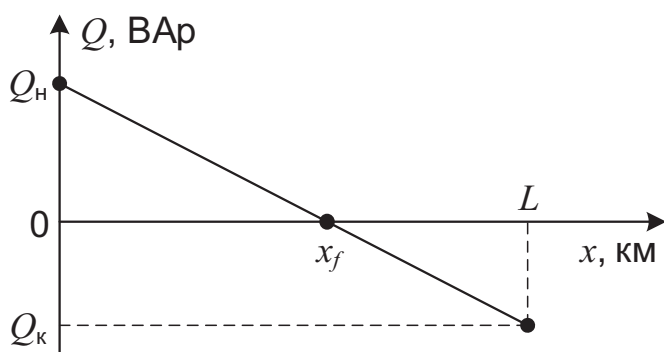


Рис. 2. Диаграмма реактивной мощности

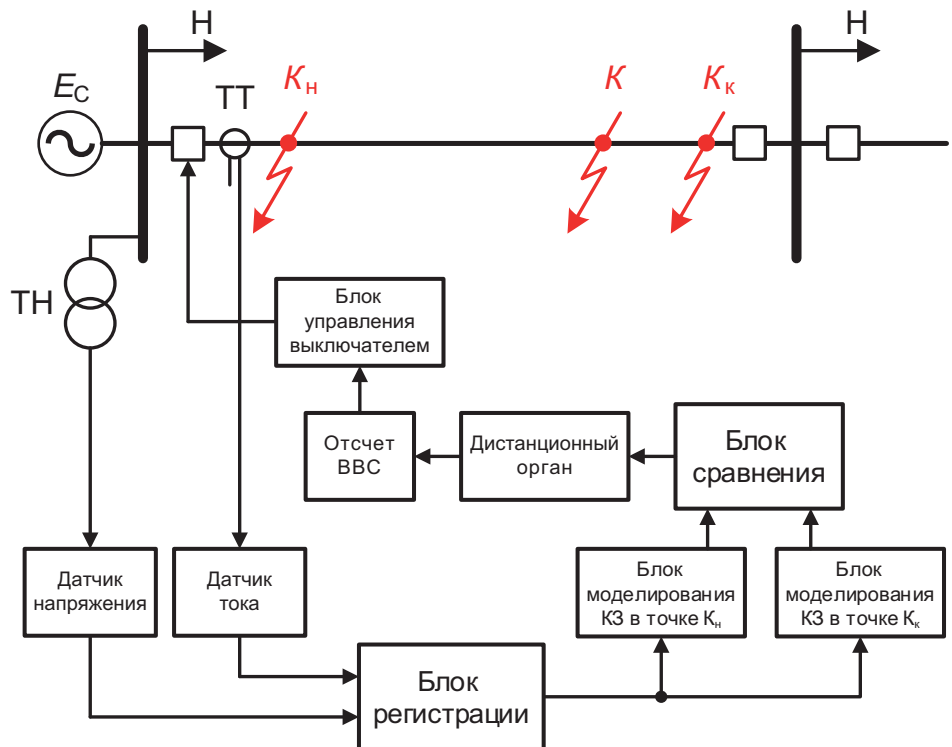


Рис. 1. Структурная схема дистанционной защиты

дения ( $I_f$ ) и напряжение в точке повреждения ( $U_f$ ), исходя из предположения, что короткое замыкание, тип которого соответствует тому, что было определено блоком регистрации, возникло в начале (точка  $K_n$ ) и конце (точка  $K_k$ ) зоны последней ступени ДЗ, соответственно. По ним рассчитывают реактивные мощности ветвей повреждения в точках  $K_n$  и  $K_k$ . При этом каждому виду замыкания соответствует свое расчетное выражение, которое в случае трехфазного замыкания будет иметь следующий вид:

$$Q_f = \text{Im}(U_f \cdot \dot{I}_f). \quad (3)$$

Знаки полученных значений реактивной мощности сопоставляются в блоке сравнения и, в случае их отличия, величины  $Q_n$  и  $Q_k$  преобразуются, согласно диаграмме, изображенной на рисунке 2, в координату повреждения по следующей формуле:

$$x_f = Q_n \cdot L / (Q_n - Q_k), \quad (4)$$

где  $L$  — длина защищаемой зоны, км.

Полученная координата дистанционным органом сравнивается с длинами зон отдельных ступеней, и в зависимости от результата сравнения формируется сигнал срабатывания конкретной ступени, а блок отсчета выдержки времени вносит соответствующую задержку на выдачу команды отключения на блок управления выключателем.

Кроме этого, полученная координата места повреждения (удаленность точки короткого замыкания) отображается на экране устройства, что позволяет быстро и эффективно организовать ремонтно-восстановительные работы.

В качестве примера можно рассмотреть схему, изображенную на рисунке 3. На ней показаны дистанционные защиты линий 1 и 2 и зоны срабатывания их ступеней.

При замыкании на расстоянии 30 км от ПС А (рисунок 4) дистанционная защита линии 1 в ходе описанных выше расчетов получит координату повреждения  $x_f^1$ , равную 30 км. При сравнении с зонами ступеней будет выполняться условие:

$$0 < x_f^1 < l_{1ст}^1,$$

и вызовет срабатывание первой ступени без выдержки времени.

Координата повреждения  $x_f^2$ , рассчитанная защитой линии 2 при этом же повреждении, будет равна 20 км, что является признаком внешнего КЗ, поэтому защита 2 не срабатывает.

При замыкании на расстоянии 10 км от ПС Б (рисунок 5) координата повреждения защиты линии 1 будет равна 60 км. Это расстояние соответствует условию срабатывания второй ступени:

$$l_{1ст}^1 < x_f^1 < l_{2ст}^1.$$

В результате защита линии 1 сформирует команду на отключение своей линии с выдержкой времени, соответствующей второй ступени защиты.

Координата повреждения, рассчитанная защитой линии 2, равна 10 км. При этом выполняется условие срабатывания первой ступени защиты 2:

$$0 < x_f^2 < l_{1ст}^2,$$

и дистанционная защита линии 2 сработает без выдержки времени.

Условие срабатывания третьей ступени защиты линии 1 можно записать так:

$$l_{2ст}^1 < x_f^1 < l_{3ст}^1.$$

При выполнении этого условия защита срабатывает с выдержкой времени, соответствующей 3 ступени.

Формально логика действия дистанционной защиты представлена в виде схемы на рисунке 6.

Сигналы срабатывания той или иной ступени формируются измерительными органами, контролирующими попадание координаты повреждения  $x_f$  в соответствующую зону:

- логический сигнал срабатывания первой ступени «Первая ступень ДЗ» при выполнении условия  $0 \leq x_f \leq l_{1ст}^1$ ;

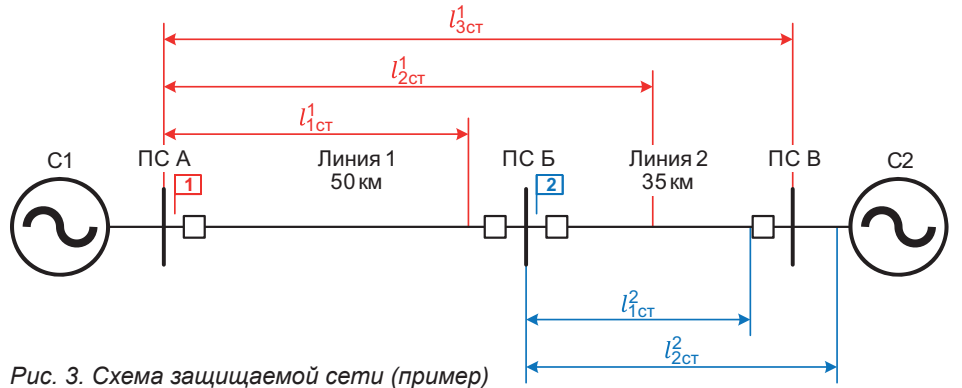


Рис. 3. Схема защищаемой сети (пример)

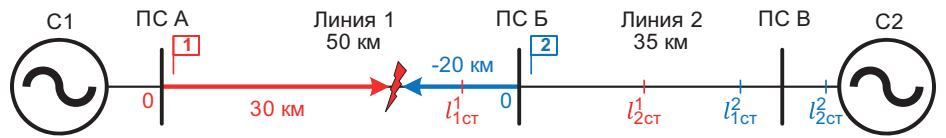


Рис. 4. Схема и диаграмма работы защит при замыкании на линии 1

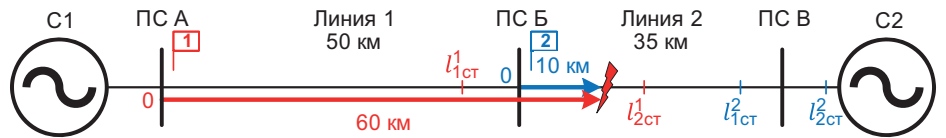


Рис. 5. Схема и диаграмма работы защит при замыкании на линии 2

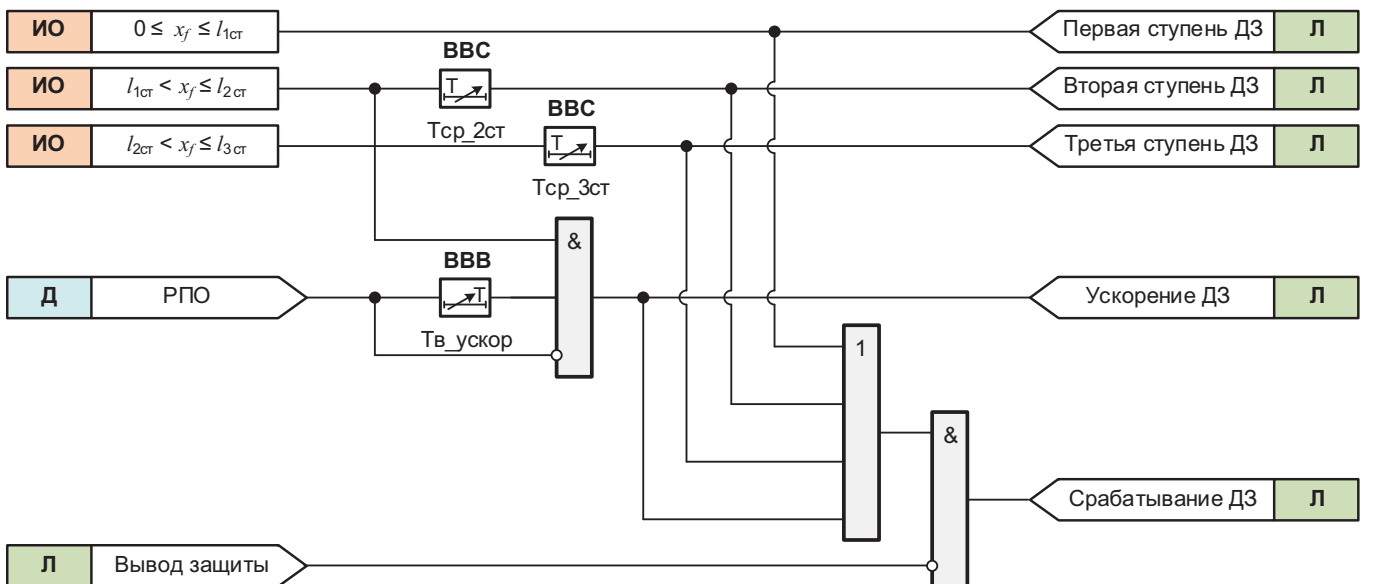


Рис. 6. Логическая схема действия дистанционной защиты

- логический сигнал срабатывания второй ступени «Вторая ступень ДЗ» при выполнении условия  $l_{1ст} \leq x_f \leq l_{2ст}$ ;
- логический сигнал срабатывания третьей ступени «Третья ступень ДЗ» при выполнении условия  $l_{2ст} \leq x_f \leq l_{3ст}$ .

При этом вторая ступень ДЗ срабатывает через время, определяемое таймером «Тср\_2ст», а третья — таймером «Тср\_3ст».

При срабатывании любой из ступеней формируется логический сигнал «Срабатывание ДЗ», действующий на отключение линии. Защита блокируется при появлении логического сигнала «Вывод защиты».

Также реализовано автоматическое ускорение (АУ) второй ступени при опробовании линии. Режим АУ вводится на время, определяемое выдержкой времени «Тв\_ускор», по факту исчезновения внешнего сигнала «РПО» от блок-контактов выключателя.

Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты выполняется с учетом особенностей защищаемой сети и реализации защиты.

Эквивалентное удельное сопротивление прямой последовательности, используемое в модели линии электропередачи, определяется следующим образом:

$$\underline{Z}_{1экр}^0 = \sum_{i=1}^N (L_i \cdot \underline{Z}_{1i}^0) / \sum_{i=1}^N L_i, \quad (5)$$

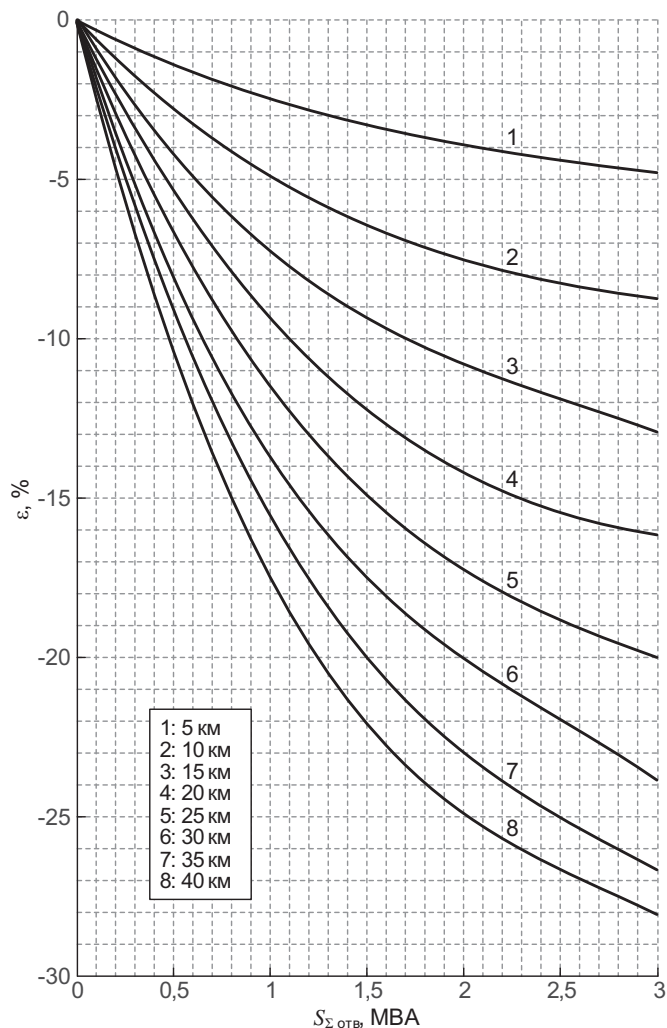


Рис. 7. Кривые относительной погрешности ОМП

где  $N$  — количество участков однородности;  $L_i$  — длина  $i$ -го участка однородности, км;  $\underline{Z}_{1i}^0$  — удельное сопротивление прямой последовательности  $i$ -го участка однородности, Ом/км.

Под участком однородности понимается отрезок ЛЭП, на протяжении которого удельное сопротивление не изменяется. При определении  $\underline{Z}_{1экр}^0$  должны учитываться все участки защищаемой и следующей линий электропередачи, в том числе и ответвления от этих ЛЭП.

Удельное сопротивление, используемое в модели ЛЭП, задается своими активной  $R^0$  и реактивной  $X^0$  составляющими, которые вычисляются следующим образом:

$$R^0 = \text{Re}(\underline{Z}_{1экр}^0); \quad (6)$$

$$X^0 = \text{Im}(\underline{Z}_{1экр}^0). \quad (7)$$

Точность определения места повреждения на линии определяется двумя основными факторами:

- разнородность линии электропередачи;
- свойства ответвительных подстанций.

Разнородность линии электропередачи выражается в неравенстве активных и индуктивных составляющих удельных сопротивлений отдельных участков. Она наиболее существенно оказывает влияние на точности ОМП в случае кабельно-воздушных линий.

Абсолютную погрешность, вызванную разнородностью линии, при вычислении расстояния до места повреждения за  $n$ -ым участком можно оценить следующим образом:

$$\delta_n = |\sum_{i=1}^n (\underline{Z}_{1i}^0 \cdot L_i) / \underline{Z}_{1экр}^0| - \sum_{i=1}^n L_i. \quad (8)$$

По формуле (8) необходимо рассчитать две ошибки: при повреждении в конце защищаемой линии  $\delta_3$  и в конце первой зоны защиты следующей ЛЭП  $\delta_{сл}$ . Последняя необязательна в случае тупиковой ЛЭП.

Составляющая ошибки ОМП  $\Delta x_H$  и коэффициент отстройки при вычислении зоны первой ступени  $k_{отс1H}$ , определяемые неоднородностью линии, будут вычисляться следующим образом:

$$\Delta x_H = -\delta_3 / 2; \quad (9)$$

$$k_{отс1H} = 1 - \Delta x_H / L, \quad (10)$$

где  $L$  — длина защищаемой линии, км.

Коэффициент отстройки при вычислении зоны второй ступени, определяемый неоднородностью линии и используемый в случае ЛЭП с двухсторонним питанием, будет вычисляться следующим образом:

$$k_{отс2H} = 1 - (\Delta x_H - \delta_{сл}) / (L + l_{1ст сл}), \quad (11)$$

где  $l_{1ст сл}$  — зона срабатывания первой ступени защиты следующей линии, км.

Ошибка, вызванная неучетом в модели ответвительных подстанций, должна определяться по кривой относительной погрешности ОМП, зависящей от суммарной мощности отпаек. На рисунке 7 представлены зависимости  $\varepsilon(S_{\Sigma отвл})$ , построенные для разных длин ЛЭП.



В качестве длины, по которой выбирается кривая, следует выбирать длину защищаемой ЛЭП, если она является тупиковой:

$$L_{кр} = L, \quad (12)$$

или сумму длин защищаемой и следующей линий в противном случае:

$$L_{кр} = L + L_{сл}, \quad (13)$$

где  $L_{сл}$  — длина следующей линии, км.

Далее, просуммировав мощности всех ответвлений в пределах выбранной длины  $L_{кр}$ , необходимо по кривой найти значение относительной погрешности ОМП  $\varepsilon$  и вычислить по ней ошибку ОМП  $\Delta x_o$  и коэффициент отстройки при вычислении зон ступеней  $k_{отс о}$ , определяемые неучетом ответвлений, по следующим формулам:

$$\Delta x_o = -(\varepsilon L_{кр}) / (2 \cdot 100); \quad (14)$$

$$k_{отс о} = 1 + \varepsilon / (2 \cdot 100). \quad (15)$$

Результат определения места повреждения должен корректироваться на величину, равную сумме двух составляющих:

$$\Delta x = \Delta x_n + \Delta x_o. \quad (16)$$

Коэффициент отстройки, используемый при вычислении зоны срабатывания первой ступени защиты, определяется следующим образом:

$$k_{отс1} = k_{отс1н} \cdot k_{отс о}. \quad (17)$$

Для второй ступени:

$$k_{отс2} = k_{отс2н} \cdot k_{отс о}. \quad (18)$$

Если полученное значение больше 0,95, то коэффициент приравнивается 0,95.

Первая ступень осуществляет защиту без выдержки времени большей части ЛЭП. Ее зона срабатывания отстраивается от длины защищаемой линии следующим образом:

$$l_{1ст} = k_{отс1} \cdot L. \quad (19)$$

Отстройка от замыканий за ответвительными подстанциями выполняется за счет того, что расстояние до места повреждения, рассчитанное методами ОМП, при КЗ за трансформатором оказывается за пределами зоны срабатывания первой ступени защиты. Однако в случае, когда длина ответвления соразмерна с длиной защищаемой ЛЭП, а на самой ответвительной подстанции имеется мощный трансформатор, могут возникнуть трудности с обеспечением селективной работы ДЗ.

Для того чтобы проверить, обеспечивается ли отстройка от замыканий за  $i$ -ым ответвлением, необходимо вычислить эквивалентное расстояние до стороны НН трансформатора по следующей формуле:

$$L_{эКВ i} = L_{отв i} + L_{т i \text{ фикт}} = L_{1i} + L_{2i} + |Z_{т i} / Z_{-1эКВ}^0|, \quad (20)$$

где  $L_{отв i} = L_{1i} + L_{2i}$  — расстояние от места установки защиты до подстанции  $i$ -го ответвления, км;  $L_{1i}$  — расстояние от места установки защиты до  $i$ -го от-

ветвления, км;  $L_{2i}$  — длина  $i$ -го ответвления, км;  $L_{т i \text{ фикт}} = |Z_{т i} / Z_{-1эКВ}^0|$  — фиктивная длина трансформатора  $i$ -го ответвления, км;  $Z_{т i}$  — сопротивление трансформатора  $i$ -го ответвления, Ом.

Если для  $i$ -го ответвления выполняется условие:

$$L_{эКВ i} \geq 1,2 \cdot L, \quad (21)$$

то защита надежно отстроена от замыканий за ней.

Если для каких-то ответвлений условие (21) не выполняется, то первая ступень должна быть отстроена от минимального расстояния до подстанций этих ответвлений:

$$l_{1ст} = k_{отс1} \cdot \min(L_{отв i}). \quad (22)$$

Для тупиковых линий в качестве длины защищаемой ЛЭП следует брать максимальное из всех получившихся значений  $L_{отв i}$ :

$$L = \max(L_{отв i}). \quad (23)$$

Вторая ступень предназначена для защиты всей линии. Для линий с двухсторонним питанием зона срабатывания второй ступени выбирается, исходя из условия согласования с первой ступенью защиты следующей ЛЭП:

$$l_{2ст} = L + k_{отс2} \cdot l_{1ст \text{ сл}}, \quad (24)$$

а для тупиковых линий принимается равной длине защищаемой ЛЭП:

$$l_{2ст} = L. \quad (25)$$

Третья ступень осуществляет резервирование защиты следующей линии и используется на линиях с двухсторонним питанием, поэтому ее зона срабатывания принимается равной сумме длин защищаемой и следующей линий с учетом возможного удлинения, обусловленного погрешностью ОМП из-за дополнительной подпитки со стороны ответвлений:

$$l_{3ст} = k_{удл} \cdot (L + L_{сл}), \quad (26)$$

где  $L_{сл}$  — длина следующей линии, км;  $k_{удл} = 1,0 \div 1,1$  — коэффициент удлинения, о.е.

На линиях с односторонним и двухсторонним питанием коэффициент удлинения следует принимать равным 1.

В случае тупиковых линий зона третьей ступени берется равной зоне второй:

$$l_{3ст} = l_{2ст}. \quad (27)$$

Первая ступень выполняется без выдержки времени, однако из-за того, что величины аварийного режима фиксируются только по факту завершения переходного процесса и необходимо время для обработки данных, сигнал на срабатывание формируется через 30÷50 мс после возникновения аварии.

В случае линии с двухсторонним питанием выдержка времени второй ступени должна быть согласована с первой ступенью защиты следующей линии (с которой производится согласование), с учетом выдержек времени устройства резервирования при отказе выключателей:

$$t_{2ст} = t_{уРОВ} + \Delta t, \quad (28)$$

где  $t_{УРОВ}$  — время действия УРОВ следующей линии, мс;  $\Delta t = 300 \div 500$  — степень селективности, мс.

Вторая ступень на тупиковых линиях согласуется с защитами трансформаторов ответвительных подстанций:

$$t_{2ст} = \Delta t. \quad (29)$$

Выдержка времени третьей ступени должна быть согласована со второй ступенью защиты следующей линии:

$$t_{3ст} = t_{2ст\ с\ л} + \Delta t, \quad (30)$$

где  $t_{2ст\ с\ л}$  — выдержка времени второй ступени следующей линии, мс.


Выдержка времени третьей ступени, устанавливаемой на тупиковых линиях, принимается равной максимально возможному значению, что означает фактический вывод из работы данной ступени.

При автоматическом ускорении вторая ступень вводится в работу на время опробования линии, и оно должно быть меньше времени включения линии с противоположной стороны при успешном АПВ. Рекомендуемое значение времени ввода автоматического ускорения 0,1 с.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана дистанционная защита с улучшенными показателями по точности и селективности, реализуемая с использованием своеобразия цифровой элементной базы, и совместимая с цифровыми системами управления подстанциями и сетями. В основу построения защиты положены методы определения места повреждения на ли-

ниях электропередачи. Это позволило повысить точность измерения удаленности точки короткого замыкания, снизить трудоемкость выбора параметров срабатывания, повысить эффективность ремонтно-восстановительных работ и, тем самым повысить надежность электроснабжения.

2. Создан опытный образец разработанной дистанционной защиты. Проведены лабораторные и заводские испытания. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили подтвердить правомерность методов построения защиты, допущений и ограничений, принятых при разработке защиты.
3. Разработана и апробирована методика выбора параметров срабатывания вновь разработанной дистанционной защиты, учитывающая особенности цифровой технологии определения удаленности места короткого замыкания. Учтены все основные ограничения и допущения, позволяющие обеспечить селективную работу защиты в реальных распределительных сетях. 

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. М.: Энергия, 1974. 680 с.
2. Ванин В.К., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.

