

УДК 621.316.925.1

**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ
ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

© 2016 г. М. Я. КЛЕЦЕЛЬ, Б. Е. МАШРАПОВ

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Республика
Казахстан*

E-mail: bokamashrapov@mail.ru

Обоснована необходимость разработки новых релейных защит параллельных линий напряжением 6–220 кВ. Предлагаются защиты, имеющие преимущества перед традиционными благодаря контролю отношений токов одноименных фаз параллельных линий и их наличия в других фазах, а также отсутствию мертвой зоны за счет исключения цепей напряжения. Представлены словесные алгоритмы функционирования защит для двух, трех и четырех параллельных линий в сетях с изолированной и заземленной нейтралью и их запись в виде функций алгебры логики. Показано, что зоны каскадного действия составляют для двух линий 11%; для трех – 8% и для четырех – 6%. Даны примеры реализации алгоритмов функционирования на логических элементах и микропроцессорах. Проанализирована работа в различных режимах.

Ключевые слова: короткие замыкания, защита, параллельные линии, ток, фаза, холостой ход, отношение, нейтраль, алгоритм.

**SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF PROTECTION
OF PARALLEL LINES FROM SHORT CIRCUITS**

M. Ya. KLETSEL, B. E. MASHRAPOV

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk
S. Toraihyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan*

E-mail: bokamashrapov@mail.ru

The necessity of development of new relay protection of parallel lines with voltage of 6–220 kV is demonstrated. The protection with advantages over traditional protection by controlling the current ratio similar phases of parallel lines and their availability in the other phases, as well as the absence of dead sections by eliminating voltage circuits is offered. The verbal functioning algorithms of protection for two, three or four parallel lines in networks with isolated or grounded neutrals and their record in the form of Boolean functions are presented. It is shown that the coverage for a cascade of two lines is 11%; three – 8%, and four – 6%. The examples of the implementation of algorithms of functioning on the logical elements and microprocessors are given. The operation of various modes is analyzed.

Key words: protection, parallel lines, power, current, phase, idling, attitude, neutral, algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в мире интенсивно разрабатываются и внедряются микропроцессорные устройства релейной защиты. Они имеют общепризнанные преимущества над электромеханическими и электронными, но их надежность — ниже [1]. Для повышения надежности микропроцессорных устройств нужно использовать мажорирование [2], причем для достижения максимального эффекта резервирующие друг друга три защиты должны иметь разные принципы действия. Однако такое повышение надежности сдерживается стоимостью устройств и отсутствием достаточного количества апробированных защит разного принципа действия. Некоторые традиционно используемые защиты имеют недостаточные надежность и чувствительность, обусловленные самим принципом действия, например, дистанционная и поперечная направленная защиты линий: первая может срабатывать излишне из-за понижения напряжения, что иногда приводит к развитию аварий до техногенных (США 1996, 2003 гг. [3, 4]); вторая отстраивается от токов нагрузки и токов в неповрежденных фазах и имеет мертвую зону по напряжению и зону каскадного действия, достигающую 25% длины линии [5]. Из-за недостатков не применяются и балансная защита [6] и защиты с поперечными связями [7, 8]. Поэтому существует необходимость разработки новых устройств защиты. В данной работе сделана попытка решить эту задачу для двух, трех и четырех параллельных линий электропередач (ЛЭП).

Идея построения защиты. Заключается в определении поврежденной линии по отношению абсолютных значений токов одноименных фаз, то есть [9]:

$$I_{p1}/I_{p2} \geq k; \quad (1a) \quad I_{p1}/I_{p3} \geq k; \quad (1б) \quad I_{p1}/I_{p4} \geq k, \quad (1в), \quad (1)$$

(1a) — для двух параллельных ЛЭП (повреждена первая линия); (1a), (1б) — для трех (повреждена первая, если выполнилось одно из неравенств (1a) или (1б)); (1a)–(1в) — для четырех (повреждена первая, если выполнилось хотя бы одно из трех неравенств). Для остальных ЛЭП неравенства записываются аналогично (повреждена вторая, если ток в ней больше, чем в остальных). В (1) индекс p это A, B или C ; 1, 2, 3, 4 — номера линий (например, I_{A1} — абсолютное значение тока в фазе A первой ЛЭП; I_{B3} — абсолютное значение тока в фазе B третьей ЛЭП).

При коротких замыканиях (КЗ) ток в поврежденной линии больше, чем в других. На определении разности этих токов основаны поперечные дифференциальные защиты. Используем их отношение, чтобы определить значение k .

Оно должно быть таким, чтобы защита не срабатывала излишне, когда нет КЗ на линиях, а отношение токов в одноименных фазах линий максимально. Это имеет место при трехфазных КЗ на шинах противоположной подстанции, когда погрешности ε_1 и ε_2 трансформаторов тока и трансреакторов, преобразующих вторичный ток ЛЭП в напряжение, достигают максимальных значений, как и погрешности ε_3 от разницы в сопротивлениях линий и ε_4 устройства, реализующего идею. В соответствии с существующими допущениями, принимаем $\varepsilon_1 = 0,1$; $\varepsilon_2 = 0,02$; $\varepsilon_3 = 0,03$; $\varepsilon_4 = 0,02$, тогда

$$k = \frac{I_{\kappa}^{\Phi} \cdot (1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{I_{\kappa}^{\Phi} \cdot (1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 - \varepsilon_4)} = 1,22,$$

где I_{κ}^{Φ} — абсолютное значение тока в фазах линий при трехфазном КЗ на шинах противоположной подстанции без учета погрешностей; с запасом принимаем $k = 1,25$.

Для защиты двух параллельных линий k рассчитывается аналогично, но без ε_3 , так как обе ЛЭП обычно располагаются на одной опоре и имеют одинаковые параметры. По результатам вычислений с запасом принимаем $k = 1,2$. При отключении одной

(двух, трех) линии работа защиты на отключение неповрежденных линий предотвращается за счет контроля токов в фазах при $I_{\phi} \leq k_{отс} I_{xx}$, где I_{xx} — ток холостого хода; $k_{отс} = 1,05$, считается, что погрешности трансформаторов тока уменьшают значение I_{xx} , а трансреакторов и микропроцессора — увеличивают.

Отметим, что предлагаемые защиты не могут быть применены с приемной стороны, так как при работе двумя линиями при КЗ на одной из них токи в одноименных фазах равны. С приемной стороны может быть использована традиционная поперечная направленная дифференциальная защита, причем для трех и четырех параллельных линий по два комплекта.

Алгоритмы защит для сетей с заземленной нейтралью. Для составления алгоритмов используем методику [10], состоящую из словесного описания условия срабатывания (УС) защиты, записи его в символах алгебры логики и реализации алгоритма на любых логических элементах или программно. УС защит двух, трех и четырех параллельных ЛЭП формулируются следующим образом.

Защита двух ЛЭП должна сработать на отключение первой, если есть сигнал $S_{1,2}^{(A)}$ о выполнении неравенства (1а) для тока в ее фазе *A* И есть сигнал $T_2^{(A)}$ о наличии тока в фазе *A* второй ЛЭП, ИЛИ есть сигнал $S_{1,2}^{(B)}$ о выполнении (1а) для тока в фазе *B* первой И есть сигнал $T_2^{(B)}$ о наличии тока в фазе *B* второй, ИЛИ есть сигнал $S_{1,2}^{(C)}$ о выполнении (1а) для тока в фазе *C* первой И есть сигнал $T_2^{(C)}$ о наличии тока в фазе *C* второй. Для второй линии УС формулируется аналогично, но в индексах цифры 1 меняются на 2, 2 — на 1.

Защита четырех ЛЭП должна сработать на отключение первой, если есть сигнал $S_{1,2}^{(A)}$ И есть сигнал $T_2^{(A)}$ о наличии тока в фазе *A* второй ЛЭП, ИЛИ есть сигнал $S_{1,3}^{(A)}$ о выполнении (1б) для тока в фазе *A* первой И есть сигнал $T_3^{(A)}$ о наличии тока в фазе *A* третьей, ИЛИ есть сигнал $S_{1,4}^{(A)}$ о выполнении (1в) для тока в фазе *A* первой И есть сигнал $T_4^{(A)}$ о наличии тока в фазе *A* четвертой. Для других фаз и линий УС формулируются аналогично.

Для защиты трех ЛЭП описание УС такое же, как для четырех, но сигналы о выполнении неравенства (1в) и о наличии тока в фазах четвертой ЛЭП не используются.

В соответствии с приведенными формулировками УС на отключение первой и второй ЛЭП записываются в символах алгебры логики следующим образом ((2а и 2б) — для двух ЛЭП, (3а, 3б) — для четырех):

$$O_1^{\text{II}} = T_2^{(A)} \cdot S_{1,2}^{(A)} + T_2^{(B)} \cdot S_{1,2}^{(B)} + T_2^{(C)} \cdot S_{1,2}^{(C)}; \quad (2a)$$

$$O_2^{\text{II}} = T_1^{(A)} \cdot S_{2,1}^{(A)} + T_1^{(B)} \cdot S_{2,1}^{(B)} + T_1^{(C)} \cdot S_{2,1}^{(C)}; \quad (2б)$$

$$O_1^{\text{IV}} = T_2^{(A)} \cdot S_{1,2}^{(A)} + T_3^{(A)} \cdot S_{1,3}^{(A)} + T_4^{(A)} \cdot S_{1,4}^{(A)} + T_2^{(B)} \cdot S_{1,2}^{(B)} + T_3^{(B)} \cdot S_{1,3}^{(B)} + \\ + T_4^{(B)} \cdot S_{1,4}^{(B)} + T_2^{(C)} \cdot S_{1,2}^{(C)} + T_3^{(C)} \cdot S_{1,3}^{(C)} + T_4^{(C)} \cdot S_{1,4}^{(C)}; \quad (3a)$$

$$O_2^{\text{IV}} = T_1^{(A)} \cdot S_{2,1}^{(A)} + T_3^{(A)} \cdot S_{2,3}^{(A)} + T_4^{(A)} \cdot S_{2,4}^{(A)} + T_1^{(B)} \cdot S_{2,1}^{(B)} + T_3^{(B)} \cdot S_{2,3}^{(B)} + \\ + T_4^{(B)} \cdot S_{2,4}^{(B)} + T_1^{(C)} \cdot S_{2,1}^{(C)} + T_3^{(C)} \cdot S_{2,3}^{(C)} + T_4^{(C)} \cdot S_{2,4}^{(C)}; \quad (3б)$$

где O_1^{II} , O_1^{IV} и O_2^{II} , O_2^{IV} — сигналы на отключение первой и второй ЛЭП; $S_{1,3}^{(B)}$, $S_{1,3}^{(C)}$ и $S_{1,4}^{(B)}$, $S_{1,4}^{(C)}$ — сигналы о выполнении (1б) и (1в) для фаз *B* и *C* первой ЛЭП (индекс 1,3 соответствует отношению тока в первой ЛЭП к току в третьей и т.д.); $T_3^{(B)}$, $T_3^{(C)}$ и $T_4^{(B)}$, $T_4^{(C)}$ — сигналы о наличии тока в фазах *B*, *C* третьей и четвертой ЛЭП; все переменные принимают значение логической 1, если есть соответствующий сигнал, и 0, — если нет.

Для других линий УС в символах алгебры логики записываются аналогично (3) с учетом указанных замен. УС защиты трех параллельных линий записывается по (3) без переменных, в индексах которых есть цифра 4.

Алгоритмы защит для сетей с изолированной нейтралью. В сетях с изолированной нейтралью возможны двойные замыкания на землю в защищаемой зоне, что равносильно двухфазному КЗ. Поскольку поврежденные фазы принадлежат разным параллельным ЛЭП, то приведенные выше УС выполняются не для одной, как при двухфазном КЗ, а для двух ЛЭП. Однако отключать нужно только одну, так как другая может некоторое время работать с замыканием на землю. Поэтому УС несколько изменяется. Защита двух ЛЭП должна сработать на отключение первой, если есть сигнал O_1^{II} , на отключение второй, если есть сигнал O_2^{II} И нет сигнала O_1^{II} . Защита четырех ЛЭП должна сработать на отключение первой, если есть сигнал O_1^{IV} , на отключение второй, если есть сигнал O_2^{IV} И нет сигналов O_1^{IV} , O_3^{IV} , O_4^{IV} ИЛИ есть сигнал O_2^{IV} И сигналы O_2^{IV} ИЛИ O_4^{IV} , на отключение третьей, если есть сигнал O_3^{IV} И нет сигналов O_1^{IV} , O_2^{IV} , O_4^{IV} ИЛИ есть сигналы O_3^{IV} и O_4^{IV} , на отключение четвертой – если есть сигнал O_4^{IV} И нет сигналов O_1^{IV} , O_2^{IV} , O_3^{IV} (O_3^{IV} и O_4^{IV} – сигналы о выполнении УС по (3) с учетом указанных замен в индексах цифр 1 на 3 и 3 на 1, 1 на 4 и 4 на 1 для третьей и четвертой линий соответственно). Возможность одновременного появления всех сигналов учитывается задержкой D^t подачи отключающего сигнала на время $t_1 = 0,02 \div 0,05$ сек, зависящее от элементной базы, на которой выполнены измерительные органы.

В символах алгебры логики эти УС записываются:

$$\begin{aligned} O_{\text{П2}}^{\text{II}} &= O_1^{\text{II}}; & O_{\text{П4}}^{\text{II}} &= O_1^{\text{IV}}; & O_{\text{В2}}^{\text{II}} &= \overline{O_1^{\text{II}}} \cdot O_2^{\text{II}} \cdot D^t; \\ O_{\text{В4}}^{\text{II}} &= \overline{O_1^{\text{IV}}} \cdot O_2^{\text{IV}} \cdot \overline{O_3^{\text{IV}}} \cdot \overline{O_4^{\text{IV}}} \cdot D^t + O_2^{\text{IV}} \cdot D^t \cdot (O_3^{\text{IV}} + O_4^{\text{IV}}); \\ O_{\text{Т4}}^{\text{II}} &= \overline{O_1^{\text{IV}}} \cdot \overline{O_2^{\text{IV}}} \cdot \overline{O_4^{\text{IV}}} \cdot O_3^{\text{IV}} \cdot D^t + O_3^{\text{IV}} \cdot O_4^{\text{IV}} \cdot D^t; & O_{\text{Ч4}}^{\text{II}} &= \overline{O_1^{\text{IV}}} \cdot \overline{O_2^{\text{IV}}} \cdot \overline{O_3^{\text{IV}}} \cdot O_4^{\text{IV}} \cdot D^t, \end{aligned} \quad (4)$$

где $O_{\text{П2}}^{\text{II}}$, $O_{\text{В2}}^{\text{II}}$ и $O_{\text{П4}}^{\text{II}}$, $O_{\text{В4}}^{\text{II}}$, $O_{\text{Т4}}^{\text{II}}$, $O_{\text{Ч4}}^{\text{II}}$ – сигналы на отключение первой, второй ЛЭП для двух параллельных линий и первой, второй, третьей и четвертой ЛЭП – для четырех.

УС для защиты трех ЛЭП записываются аналогично, и она выдает сигналы $O_{\text{П3}}^{\text{II}}$, $O_{\text{В3}}^{\text{II}}$ и $O_{\text{Т3}}^{\text{II}}$ на отключение, соответственно, первой, второй и третьей линий.

Программная реализация алгоритмов. Рассмотрен пример реализации для защиты двух параллельных линий в сетях с заземленной нейтралью. На рис. 1 представлена структура алгоритма. Вводятся токи I_{xx1} и I_{xx2} холостого хода первой и второй ЛЭП, логические переменные $T_1^{(A)}$, $T_1^{(B)}$, $T_1^{(C)}$, $T_2^{(A)}$, $T_2^{(B)}$, $T_2^{(C)}$, $S_{1,2}^{(A)}$, $S_{1,2}^{(B)}$, $S_{1,2}^{(C)}$, $S_{2,1}^{(A)}$, $S_{2,1}^{(B)}$, $S_{2,1}^{(C)}$ и коэффициенты $k_{\text{отс}}$ отстройки и k (для упрощения показаны только переменные для фазы А). Параллельно обрабатываются мгновенные значения фазных токов i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} и i_{A2} , i_{B2} , i_{C2} первой и второй ЛЭП, после цифровой фильтрации находятся их абсолютные значения I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} и I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} и сравниваются с токами I_{xx} . Если они больше I_{xx} , то переменные $T_1^{(A)} \div T_2^{(C)}$ принимают значение 1, в противном случае – 0 (например, для фазы А первой линии $T_1^{(A)} = 0$ при $I_{A1} \leq k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{xx1}}$). Находятся отношения $k_{1,2}^{(A)}$, $k_{1,2}^{(B)}$, $k_{1,2}^{(C)}$, $k_{2,1}^{(A)}$, $k_{2,1}^{(B)}$, $k_{2,1}^{(C)}$ (например, $k_{1,2}^{(A)} = I_{A1}/I_{A2}$) и сравниваются с k . Если $k_{1,2}^{(A)}$ ($k_{1,2}^{(B)}$, $k_{1,2}^{(C)}$) $\geq k$, то логическая переменная $S_{1,2}^{(A)}$ ($S_{1,2}^{(B)}$, $S_{1,2}^{(C)}$) равна 1, $S_{2,1}^{(A)}$ ($S_{2,1}^{(B)}$, $S_{2,1}^{(C)}$) = 0. Если нет, то проверяется неравенство $k_{2,1}^{(A)}$ ($k_{2,1}^{(B)}$, $k_{2,1}^{(C)}$) $\geq k$. При его выполнении $S_{1,2}^{(A)}$ ($S_{1,2}^{(B)}$, $S_{1,2}^{(C)}$) равна 0, $S_{2,1}^{(A)}$ ($S_{2,1}^{(B)}$,

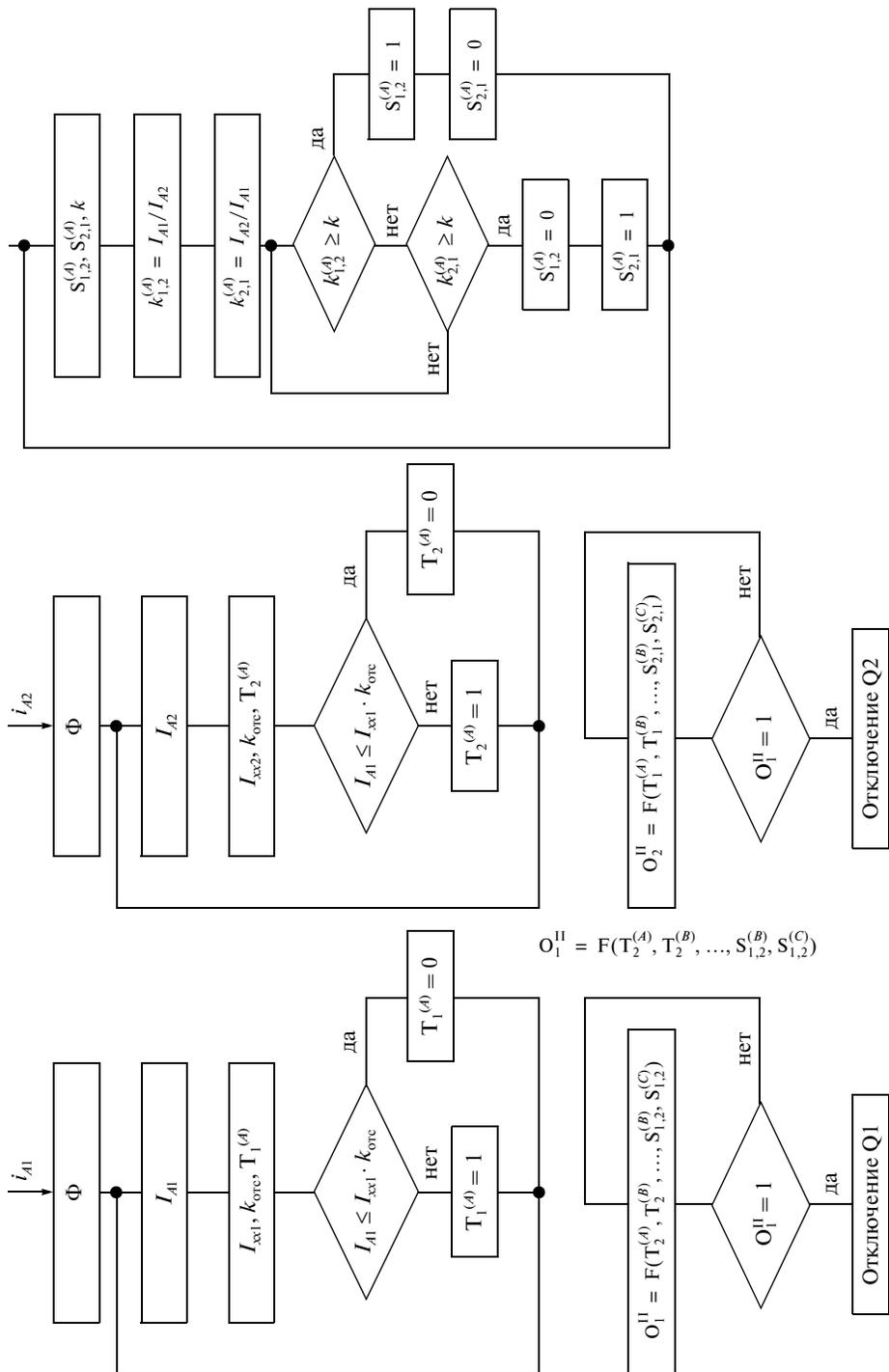


Рис. 1. Структурная схема программной реализации алгоритма защиты для фазы *A* двух параллельных линий

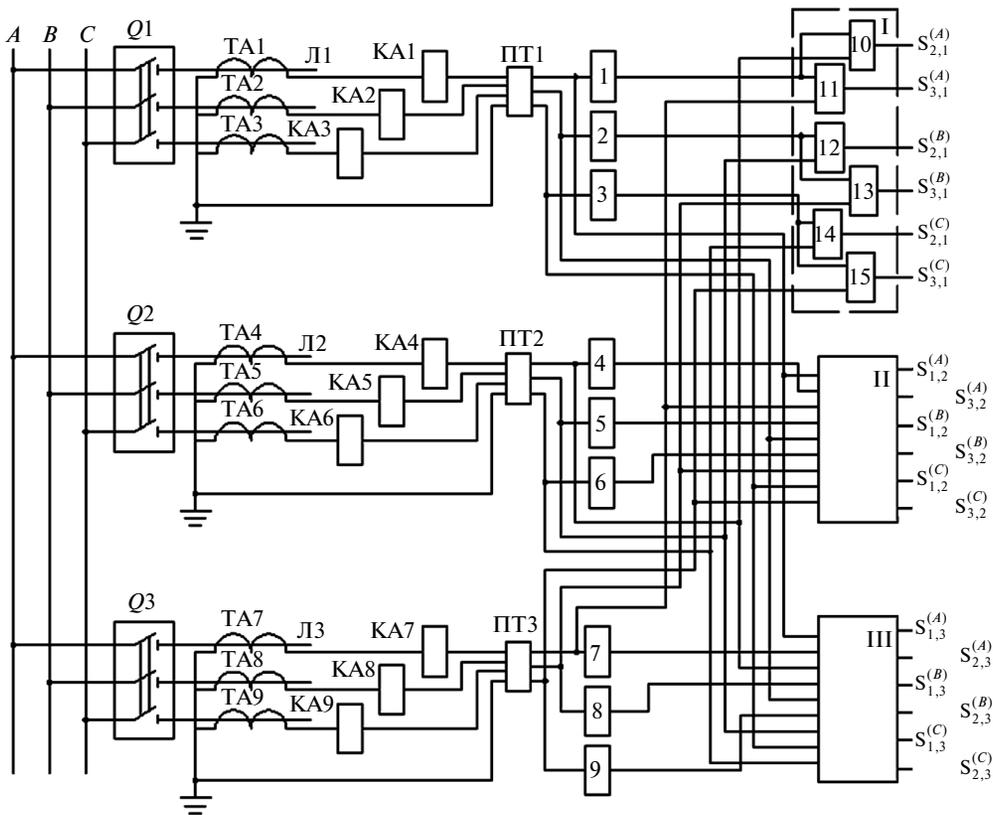


Рис. 2. Схема подключения измерительных органов защиты трех параллельных линий

$S_{2,1}^{(C)} - 1$, при невыполнении эти неравенства проверяются повторно. Защита действует на отключение выключателя Q_1 первой или Q_2 второй линий, если $-O_1^I = 1$ или $O_2^I = 1$.

Реализация алгоритмов на логических элементах. На рис. 2 дана схема подключения измерительных органов защиты трех параллельных линий, на рис. 3 – схема ее алгоритма функционирования для сетей с заземленной нейтралью (в блоках II, III и V, VI элементы и их соединения такие же, как и в блоках I и IV соответственно). Токи нагрузки в фазах ЛЭП контролируются реле $KA_1 \div KA_9$, которые подключены, как и преобразователи тока ПТ1, ПТ2 и ПТ3 (каждый содержит по три трансреактора), к трансформаторам тока $TA_1 \div TA_9$. Реле тока отстраиваются от токов I_{xx} и в нормальном режиме

выдают сигналы $T_1^{(A)} \div T_3^{(C)}$ соответственно. Неравенства (1а) и (1б) для каждой фазы первой, второй и третьей ЛЭП проверяются в схемах $10 \div 27$ сравнения, подключенных первыми входами к блокам 1–9, в которых текущее значение тока в фазе умножается на $k = 1, 2, 5$, вторыми – к преобразователям тока. Схемы сравнения при выполнении этих неравенств выдают сигналы, показанные на рис. 3. Сигналы от токовых реле и схем сравнения поступают на входы блоков IV, V и VI логики, которые содержат логические элементы И 28–34 и ИЛИ 35–37, а с их выходов на элементы ИЛИ 38, 39, 40. После обработки сигналов (в случае выполнения УС по (3)) с выхода элемента ИЛИ 38 (39) и (40) подается сигнал O_1 (O_2 и O_3) на отключение выключателя Q_1 (Q_2 и Q_3).

Для сетей с изолированной нейтралью в принципиальную схему алгоритма функционирования защиты трех параллельных линий (рис. 3) вводится блок VII, выбирающий

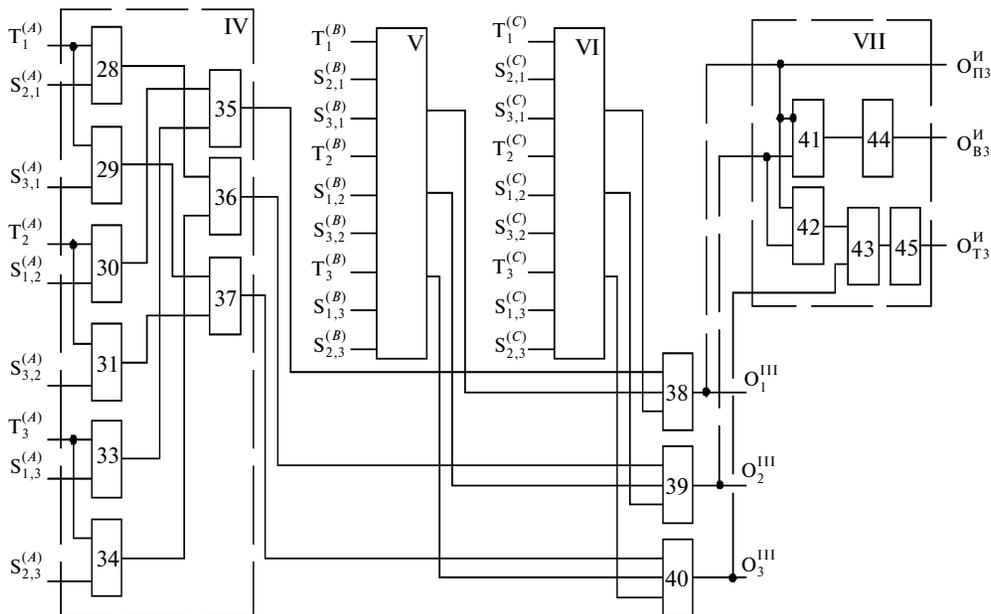


Рис. 3. Принципиальная схема алгоритма функционирования защиты трех параллельных линий для сетей с заземленной нейтралью на логических элементах

какую линию отключать. Он содержит логические элементы И 41 с инверсным входом, ИЛИ-НЕ 42, И 43 и элементы ВРЕМЯ 44, 45.

Анализ работы защит, выполненных по приведенным алгоритмам. Рассмотрим работу защиты трех ЛЭП, построенную на полупроводниковых элементах (рис. 2, 3). Пусть в сети с заземленной нейтралью произошел обрыв провода фазы *A* первой ЛЭП с КЗ его с противоположной стороны, тогда в ней нет тока со стороны места установки защиты, в остальных фазах – есть. Следовательно, реле КА1 сигнала не выдает, а реле КА2–КА9 выдают. УС выполняются только для схем 10 и 11 сравнения. Поэтому на выходах всех элементов И сигналы отсутствуют. Защита не срабатывает. При однофазном КЗ, например, в фазе *A* второй ЛЭП, токи протекают в фазах всех линий. Реле КА1–КА9 сработаны и выдают сигналы. УС выполняются для схем 10 и 23 сравнения. Элементы И 38, 34 и ИЛИ 36 блока I и ИЛИ 39 выдают сигналы, выключатель Q_1 отключается.

При двойных замыканиях в сети с изолированной нейтралью, например в фазах *A* и *B* на первой и третьей линиях соответственно, УС выполняются для схем сравнения 13 и 16, 19, 22 (на рис. 3 не показано). При этом реле тока КА1–КА9 находятся в сработанном состоянии. Элементы ИЛИ 38, 40 выдают сигналы, элемент И 42 – нет, поэтому выдается сигнал $O_{ПЗ}^I$ на отключение первой линии.

Рассмотрим работу защиты двух ЛЭП при программной реализации (рис. 1). В случае отключения одной из ЛЭП с противоположной стороны, например второй, токи в ее фазах отсутствуют, в первой – присутствуют. Поэтому I_{A2}, I_{B2}, I_{C2} меньше $k_{отс} I_{кз2}$. В результате $T_2^{(A)}, T_2^{(B)}, T_2^{(C)}$ равны 0, $T_1^{(A)}, T_1^{(B)}, T_1^{(C)}$ – 1. Отношения $k_{1,2}^{(A)}, k_{1,2}^{(B)}, k_{1,2}^{(C)}$ становятся больше k , $k_{2,1}^{(A)}, k_{2,1}^{(B)}, k_{2,1}^{(C)}$ – меньше. $S_{1,2}^{(A)}, S_{1,2}^{(B)}, S_{1,2}^{(C)}$ равны 1, $S_{2,1}^{(A)}, S_{2,1}^{(B)}, S_{2,1}^{(C)}$ – 0. Условие по (2) не выполняется, и защита не срабатывает. При каскадном отключении двухфазного КЗ, например, между фазами *B* и *C* на второй ЛЭП, ток в них есть, в фазе *A* – нет. Отношения $k_{1,2}^{(A)}, k_{2,1}^{(B)}, k_{2,1}^{(C)}$ становятся больше k , $k_{1,2}^{(B)}, k_{1,2}^{(C)}, k_{2,1}^{(A)}$ – меньше. Поэтому

переменные $T_1^{(A)}, T_1^{(B)}, T_1^{(C)}, T_2^{(B)}, T_2^{(C)}, S_{1,2}^{(A)}, S_{2,1}^{(B)}, S_{2,1}^{(C)}$ равны 1, $T_2^{(A)}, S_{1,2}^{(B)}, S_{1,2}^{(C)}, S_{2,1}^{(A)}$ равны 0. В результате $O_1^{\text{II}} = 0, O_2^{\text{II}} = 1$ подается команда на отключение выключателя Q_2 . При однофазном КЗ в зоне каскадного действия, например, на первой ЛЭП в фазе A , токи в двух других ее фазах отсутствуют, во второй ЛЭП протекают во всех фазах. Поэтому переменные $T_1^{(B)}, T_1^{(C)}$ равны 0, а $T_1^{(A)}, T_2^{(A)}, T_2^{(B)}, T_2^{(C)} = 1$. Переменные $k_{1,2}^{(A)}, k_{2,1}^{(B)}, k_{2,1}^{(C)}$ больше $k, k_{2,1}^{(C)}, k_{1,2}^{(C)}, k_{2,1}^{(A)}$ — меньше. Поэтому $S_{1,2}^{(A)}, S_{2,1}^{(B)}, S_{2,1}^{(C)}$ равны 1, $S_{1,2}^{(B)}, S_{1,2}^{(C)}, S_{2,1}^{(A)} = 0$. Следовательно $O_1^{\text{II}} = 1, O_1^{\text{I}} = 0$. Выключатель Q_1 отключается.

При обрыве провода, например фазы A первой ЛЭП, с КЗ на землю (сети с заземленной нейтралью) с противоположной стороны переменные $T_1^{(B)}, T_1^{(C)}, T_2^{(A)}, T_2^{(B)}, T_2^{(C)}, S_{2,1}^{(A)}$ принимают значение 1, все остальные — 0. Поэтому $O_1^{\text{II}} = 0, O_2^{\text{II}} = 0$. Защита не срабатывает. Аналогично рассматривается работа защит и в остальных режимах.

Чувствительность. Согласно [3, 7], чувствительность поперечных дифференциальных защит параллельных линий, являющихся аналогами предлагаемых, характеризуется величиной $I_{к.д}$ зоны каскадного действия, $I_{к.д} = s \cdot l$ (где l — длина линии; s — ее часть) и k_q — коэффициентом чувствительности пусковых органов $k_q = I_{к.мин} / I_{с.з}$ ($I_{к.мин}$ — минимальный ток КЗ в точке повреждения, находящейся на границе зоны каскадного действия, после отключения линии со стороны питаемой подстанции; $I_{с.з}$ — ток срабатывания защиты). $I_{с.з}$ отстраивается от максимальных токов $I_{н.макс}$ нагрузки, как и у защит [7, 8, 11]. В предлагаемой защите пусковые органы реагируют на отношение k токов одноименных фаз, которое не зависит от $I_{н.макс}$ и $I_{к.мин}$. Поэтому k_q не может быть использован, а чувствительность защиты оценивается только зоной каскадного действия. Ее величина определяется из выражения, полученного следующим образом. Пусть n — число параллельно работающих линий, тогда при КЗ на одной из них на границе зоны каскадного действия число неповрежденных ЛЭП равно $(n - 1)$. Токи к месту КЗ протекают по двум ветвям: I_1 — по участку поврежденной линии со стороны источника питания, I — с ее противоположной стороны. Считая, что сопротивления z неповрежденных ЛЭП равны, имеем

$$I = (n - 1) \cdot I_2,$$

где I_2 — ток в одной из них. Учитывая, что величины токов I_1 и I обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей их протекания; $z = l \cdot z_0, z_0$ — удельное сопротивление, после простых преобразований получаем:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{l + (n - 1)I_{к.д}}{l - I_{к.д}}. \quad (5)$$

Так как $I_1/I_2 = k$, то из (5) следует: для защит трех и четырех параллельных линий при $k = 1,25$ часть, определяющая зону каскадного действия, $s = 0,06 \div 0,11$ (меньшее значение соответствует большему числу включенных линий), а для двух при $k = 1,2$ — $s = 0,09$. При использовании более точных датчиков тока зона каскадного действия уменьшается, например, при погрешности $\varepsilon_1 = 0,02, s = 0,036 \div 0,05$, а при $\varepsilon_1 = 0,05$ — $s = 0,05 \div 0,07$. Следует отметить, что ни одна из предложенных защит не отстраивается от токов нагрузки и токов в неповрежденных фазах при КЗ на землю в режиме каскадного действия.

Для проверки результатов проведенного анализа предложенных защит разработана математическая модель в программе Multisim 8.0. Моделирование подтвердило правильность положений, взятых в основу построения защиты, и ее работоспособность. В Приложении приведена часть модели и рассмотрено поведение защиты при КЗ между фазами A и B и фазы A на землю, а также при отключенном состоянии одной из линий.

ВЫВОД

Можно полагать, что предлагаемые защиты параллельных линий, построенные по разработанным алгоритмам, будут обладать более высокой чувствительностью, чем известные аналогичные, так как они не имеют мертвой зоны и цепей напряжения. Однако они могут быть применены только на линиях с односторонним питанием и должны быть установлены со стороны источника питания.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Модель защиты двух параллельных линий для фаз *A* представлена на рис. П1. Линии имеют длину 4 км и работают на напряжение 110 кВ. Система представлена в виде фазных ЭДС *VA*, *VB*, *VC*, активных сопротивлений *R1*, *R2*, *R3* и индуктивностей *L1*, *L2*, *L3*, соответственно, фаз *A*, *B*, *C*.

Фаза *A* первой (второй) линии представлена в виде активных сопротивлений *R4*, *R10* (*R5*, *R11*) и индуктивностей *L4*, *L10* (*L5*, *L11*); фаза *B* первой (второй) линии – *R6*, *R12* (*R7*, *R13*) и *L6*, *L12* (*L7*, *L13*); фаза *C* первой (второй) линии – *R8* (*R9*) и *L8* (*L9*). Фазы *A* и *B* обеих линий выполнены из четырех сопротивлений, так как моделировались *K3* между фазами на первой и второй линиях (осуществляется ключами *J1* и *J3*, соответственно) и *K3* на землю фазы *A* первой линии (ключом *J10*). Кроме того, рассматривалось поведение защиты при отключенном состоянии одной из линий. Отключение фазы *A* первой (второй) линии осуществляется ключом *J6* (*J5*).

Функции трансформаторов тока, установленных в расщелку фаз *A* первой и второй линий, выполняют трансформаторы *T1* и *T3*, при этом их первичные обмотки имеют сопротивление, близкое к нулю. Функции токового реле, подключенного к вторичной обмотке трансформатора *T1* (*T3*) и контролирующего наличие тока в первой (второй) линии, выполняет схема, состоящая из двух ключей *J7*, *J8* (*J9*, *J11*) постоянного тока, источника постоянного тока *V5* (*V4*), конденсатора *C1* (*C2*) и нагрузочного резистора *R17* (*R22*). Необходимость в такой схеме обусловлена тем, что в программе отсутствует реле, работающее на переменном напряжении. Указанная схема работает следующим образом. При протекании переменного тока по обмотке *J7.1* (*J9.1*) управления ключа *J7* (*J9*) его контакты *J7.2* (*J9.2*) замыкаются в положительную полуволну переменного тока и размыкаются – в отрицательную. В моменты замкнутого состояния контактов *J7.2* (*J9.2*) ключа *J7* (*J9*) на обмотку *J8.1* (*J11.1*) управления ключа *J8* (*J11*), конденсатора *C1* (*C2*) и резистора подается напряжение от источника питания *V5* (*V4*). Поэтому конденсатор *C1* (*C2*) заряжается, а ключ *J8* (*J11*) замыкает контакты и выдает сигнал на один из входов элемента И *U14A* (*U12A*). В моменты разомкнутого состояния контактов *J7.2* (*J9.2*) ключа *J7* (*J9*) в отрицательную полуволну переменного тока контакты *J8.2* (*J11.2*) ключа *J8* (*J11*) остаются замкнутыми, так как происходит разряд конденсатора *C1* (*C2*), и обмотка *J8.1* (*J11.1*) управления этого ключа обтекается током. Поэтому сигнал о наличии тока в фазе *A* линии не пропадает. При отсутствии тока в фазе *A* первой (второй) линии (разомкнут ключ *J6* (*J5*)) после того как разрядится конденсатор *C1* (*C2*) ключ *J8* (*J11*) размыкает контакты *J8.2* (*J11.2*), и сигнал на вход элемента *U14A* (*U12A*) не поступает.

Схема сравнения, проверяющая выполнение неравенства (1а), состоит из двух диодных мостов *D1*, *D2*; индуктивностей *L18*, *L17*, сглаживающих пульсации тока на их выходах; резисторов *R20*, *R19*, сопротивления которых подобраны так, чтобы защита не срабатывала при отсутствии *K3* на линиях (обеспечивают $k = 1,2$); и ключа *J2* постоянного тока. Ключ *J2* срабатывает, если направление тока, протекающего по его обмотке *J2.1* управления, совпадает с направлением, указанным на самом ключе, что и происходит, когда ток в фазе *A* первой линии больше тока во второй. Контакты *J2.2* ключа *J2* подключены к свободному входу элемента *U12A*, а выход последнего подключен к лампе *X1*, сигнализирующей о наличии повреждения на первой линии. Аналогично построена схема сравнения, проверяющая условие срабатывания защиты при

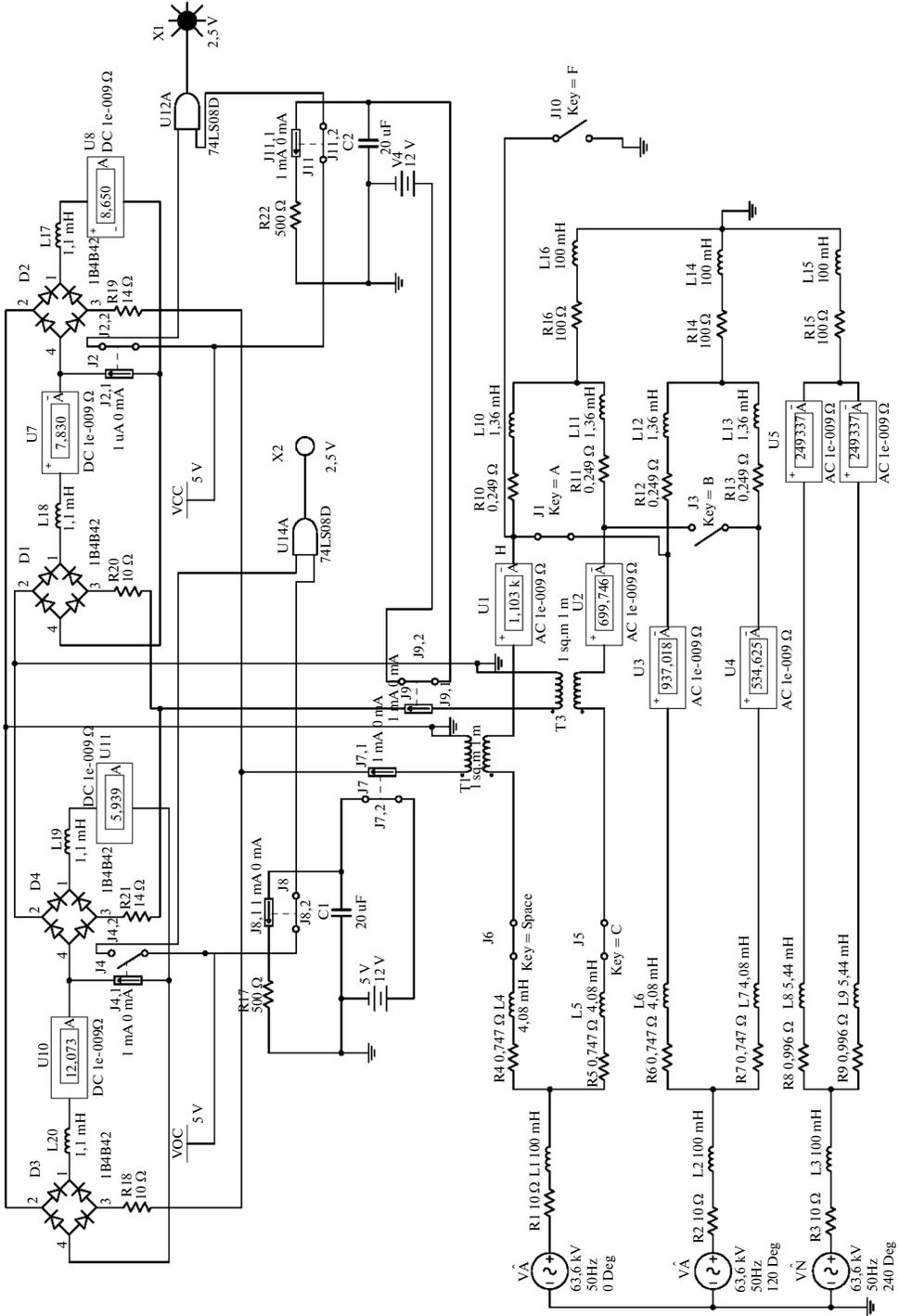


Рис. П1. Схема модели двух параллельных линий и защиты для фазы А

КЗ на второй линии (диодные мосты D4, D3, индуктивности L20, L19, резисторы R21, R18 и ключ J4 постоянного тока).

Рассмотрим работу устройства. При отсутствии КЗ из-за равенства сопротивлений фаз первой и второй линий, например, фаз *A*, образованных резисторами R4, R10 и R5, R11 и индуктивностями L4, L10 и L5, L11 соответственно, токи в них равны. При этом токи на выходах 1 диодных мостов D1, D3 больше токов на выходах 1 мостов D2, D4 из-за неравенства сопротивлений резисторов R20, R18 и R19, R21. В результате через обмотки J2.1 и J4.1 управления ключей J2 и J4 протекает ток. Однако они не замыкают контакты J2.2 и J4.2, так как направление тока в их обмотках не совпадает с направлением, указанным на ключах. Поэтому схемы сравнения не выдают сигналы, и защита не срабатывает (лампы X1 и X2 не горят). Для имитации КЗ, например, между фазами *A* и *B* первой линии, на рис. П1 замыкается ключ J1. При этом сопротивление фазы *A* первой линии до точки Н короткого замыкания уменьшается на величину сопротивлений R10, L10, а сопротивление фазы *A* второй увеличивается на R10, L10. Поэтому ток в фазе *A* первой линии становится больше тока в фазе *A* второй. В результате ток на выходе 1 диодного моста D2 больше тока на выходе 1 моста D1, и через обмотку J2.1 управления ключа J2 протекает ток, под действием которого он замыкает контакты J2.2, и схема сравнения устройства защиты выдает сигнал на один из входов элемента U12A. Так как ток в фазе *A* второй линии присутствует, контакты J11.2 ключа J11 замкнуты, и схема, выполняющая функции реле тока, выдает сигнал на другой вход элемента U12A. В результате на выходе элемента U12A появляется сигнал, и загорается лампа X1, сигнализируя о наличии повреждения на первой линии. Аналогичный анализ показывает, что защита ведет себя верно и в других режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич В.И. Проблемы оценки надежности релейной защиты // *Электричество*. 2011. № 2. С. 28–31.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Кощеев Л.А., Семенов В.А. Системные аварии в Западном энергообъединении США // *Электричество*. 1997. № 10. С. 24–28.
4. Служба РЗА СО – ЦДУ ЕЭС. Справка о развитии и причинах аварии в энергосистеме восточного побережья США 14 августа 2003 года [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.ipc.ru/~mvo/OdnolinejnayaModel/blackout4webRZAinRussianWithMaps.pdf>, свободный.
5. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
6. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2008. 639 с.
7. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник для вузов. М.: Желдориздат, 2002. 720 с.
8. Поляков В.Е., Клецель М.Я. Централизованная токовая направленная защита // *Изв. вузов. Энергетика*. 1977. № 3. С. 9–14.
9. Пат. 2530543 РФ. МПК H02N 7/00, H02N 7/26, Устройство для защиты двух параллельных линий / Клецель М.Я., Машрапов Б.Е. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”. № 2013128791/07/ Бюлл. 2014. № 28.
10. Поляков В.Е., Жуков С.Ф., Проскурин Г.М. и др. Теоретические основы построения логической части релейной защиты и автоматике энергосистем. М.: Энергия, 1979. 238 с.

Поступила в редакцию
26.VI.2014