

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАЩИТ ЛИНИЙ К ДВУХФАЗНЫМ КЗ ЗА МАЛОМОЩНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Н.М. ЗАЙЦЕВА<sup>1</sup>, М.Я. КЛЕЦЕЛЬ<sup>2</sup>, К.И. НИКИТИН<sup>3</sup>, К.С. ТАРОНОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Инновационный евразийский университет, г. Павлодар, Казахстан

<sup>2</sup>Научный Исследовательский Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Омский государственный технический университет

<sup>4</sup>Павлодарский государственный университет им С. Торайгырова, Казахстан

*Предложен следующий алгоритм действия измерительного органа резервных защит: непрерывно определяются разности векторов токов фаз А и В, В и С, С и А в данный и предыдущий моменты времени, эти разности вычитаются друг из друга, а затем — и их разности. Показано, что это обеспечивает требуемую чувствительность к двухфазным коротким замыканиям за мало мощными трансформаторами ответвлений. Рассмотрены блокировки, обеспечивающие правильную работу защиты в различных режимах. Представлен алгоритм логической части. Отмечены трудности реализации на статических элементах и при двустороннем питании.*

*Ключевые слова: линия с ответвлениями, короткие замыкания, защита, чувствительность, разность токов.*

**Постановка задачи.** В настоящее время резервные защиты линий (ВЛ) значительной длины, как и ранее [1], зачастую не обладают достаточной чувствительностью к коротким замыканиям (КЗ) за мало мощными трансформаторами ответвлений. Имеются предложения по ее обеспечению [2,3,4] для случаев, когда ток  $I_{ТА}$ , протекающий при этих КЗ через трансформаторы тока (ТА1) защищаемой ВЛ (рис.1), составляет без учета тока нагрузки  $0,3 I_{раб.макс}$ , где  $I_{раб.макс}$  — ее максимальный рабочий ток. Однако на линиях 110 кВ длиной 100–130 км с нагрузкой 70–50 МВА с трансформаторами в конце линии мощностью 2,5–4 МВА ток  $I_{ТА}=(0,1\div 0,2) I_{раб.макс}$ . Такие линии имеются, например, в Тюменской, Омской, Владивостокской областях и в Казахстане. Аналогичная картина с защитами кабелей 6–10 кВ, питающих шины, к которым подключены мало мощные трансформаторы и значительная нагрузка. Чтобы выявить упомянутые токи предлагается следующий алгоритм действия измерительного органа (ИО) защиты при двухфазных КЗ.

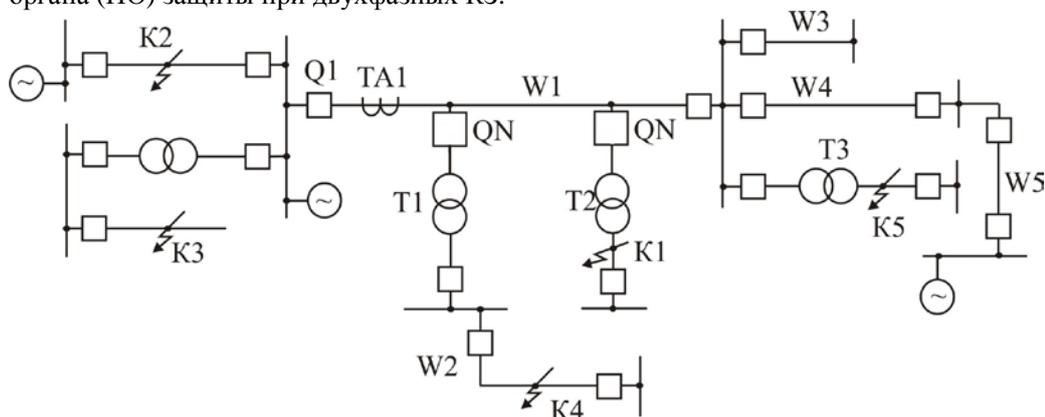


Рис. 1. Схема сети

### Алгоритм действия ИО

1. Непрерывно определяются разности векторов токов фаз  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$ ,  $C$  и  $A$ . Каждая из них запоминается на время  $t_{\Pi}$  (оно определено далее).

2. Из разностей векторов токов фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ :

$$\bar{I}_{HAB} = \bar{I}_{HA} - \bar{I}_{HB}, \bar{I}_{HBC} = \bar{I}_{HB} - \bar{I}_{HC}, \bar{I}_{HCA} = \bar{I}_{HC} - \bar{I}_{HA},$$

определенных в данный момент времени (через  $t_{\Pi}$  после предыдущего), вычитаются соответствующие разности векторов токов фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  предыдущего (за время  $t_{\Pi}$ ) режима:

$$\bar{I}_{HAB}^{PP} = \bar{I}_{HA}^{PP} - \bar{I}_{HB}^{PP}, \bar{I}_{HBC}^{PP} = \bar{I}_{HB}^{PP} - \bar{I}_{HC}^{PP}, \bar{I}_{HCA}^{PP} = \bar{I}_{HC}^{PP} - \bar{I}_{HA}^{PP},$$

где  $\bar{I}_{HA}$ ,  $\bar{I}_{HB}$ ,  $\bar{I}_{HC}$  и  $\bar{I}_{HA}^{PP}$ ,  $\bar{I}_{HB}^{PP}$ ,  $\bar{I}_{HC}^{PP}$  – вектора токов фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  текущего и предыдущего режимов. Обозначим результаты этих вычитаний:

$$\bar{I}_{AB} = \bar{I}_{HAB} - \bar{I}_{HAB}^{PP}, \bar{I}_{BC} = \bar{I}_{HBC} - \bar{I}_{HBC}^{PP}, \bar{I}_{CA} = \bar{I}_{HCA} - \bar{I}_{HCA}^{PP}.$$

3. Из второго результата по пункту 2 вычитается первый, из третьего – второй, из первого – третий. В итоге получаем:

$$\bar{I}_{P1} = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \bar{I}_{P2} = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}, \bar{I}_{P3} = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}.$$

4. Модули токов  $\bar{I}_{P1}, \bar{I}_{P2}, \bar{I}_{P3}$  сравниваются с (уставкой) током  $I_{CP}$  срабатывания ИО, и если один из них больше или равен  $I_{CP}$ , то ИО срабатывает и выдает сигнал в логическую часть защиты. При микропроцессорном исполнении сравнение можно проводить с частотой дискретизации в 1–2 мс, т.к. этого времени вполне достаточно, чтобы его осуществить, при полупроводниковом – 0,02 с. Не предъявляя к точности дискретизации особых требований, это обеспечит высокую точность уставки по времени  $t_{c3}$  срабатывания защиты (для резервных защит линий  $t_{c3} \geq 1$  с), так как 2 мс составляют 0,2% от 1 с. Первое сравнение с уставкой происходит через время  $t_{\Pi}$  после запуска защиты (рис.2). Если за это время произойдет КЗ, то время ее работы может увеличиваться до  $t_{c3} + t_{\Pi}$ . Поэтому  $t_{\Pi}$  должно быть минимальным, но обеспечивающим все операции при реализации алгоритма, т.е. больше частоты дискретизации и времени существования (0,01–0,03 с) возможной помехи в цепях трансформатора тока. С запасом можно принимать  $t_{\Pi} = (0,05–0,1)$ с.

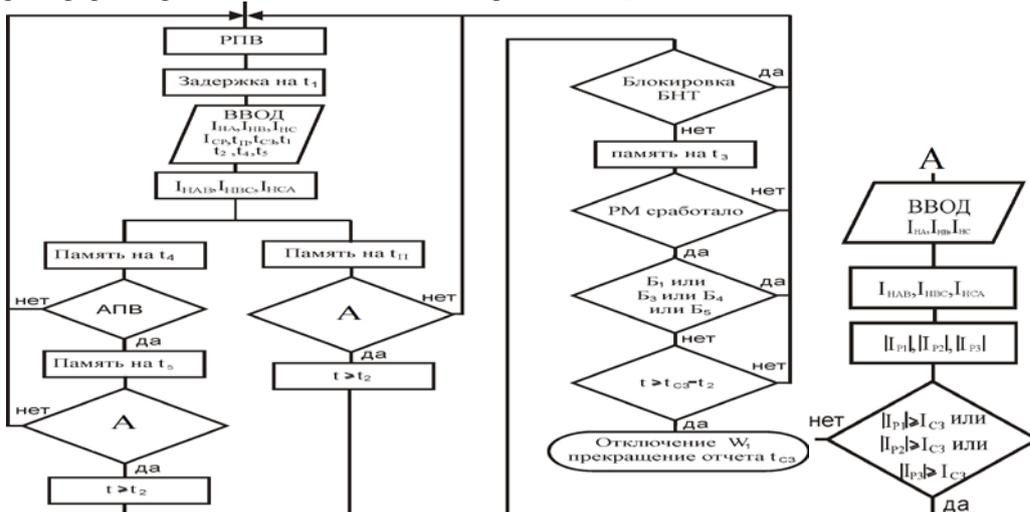


Рис. 2. Структурная схема алгоритма защиты

**Выбор тока срабатывания.** Если в течение времени  $t_{\text{п}}$  режим не меняется, то, пренебрегая погрешностями ТА и устройств, реализующих алгоритм, можно считать, что  $\bar{I}_{AB} = 0$ ,  $\bar{I}_{BC} = 0$ ,  $\bar{I}_{CA} = 0$ . (Чтобы не загромождать статью здесь и далее не будем вводить обозначения вторичных токов и коэффициент трансформации ТА1 защищаемой линии  $W_1$  (рис.1), поскольку это не влияет на представляемые соотношения). В действительности имеются погрешности, вызванные, в основном, несимметрией токов нагрузки. Поэтому  $\bar{I}_{AB} = \bar{I}_{\text{НБ1}}$ ,  $\bar{I}_{BC} = \bar{I}_{\text{НБ2}}$ ,  $\bar{I}_{CA} = \bar{I}_{\text{НБ3}}$ , где  $\bar{I}_{\text{НБ1}}$ ,  $\bar{I}_{\text{НБ2}}$ ,  $\bar{I}_{\text{НБ3}}$  токи небаланса, отнесенные к напряжению  $W_1$ . Тогда, после вычитания по пункту 3 алгоритма,  $\bar{I}_{P1} = I_{\text{НБ2}} - I_{\text{НБ1}}$  ( $\bar{I}_{P2}, \bar{I}_{P3}$  – аналогичны). Чтобы защита не сработала, ток  $I_{\text{ср}}$  срабатывания должен быть больше максимальной разности токов  $|I_{\text{НБМ}}|$  небаланса. С учетом коэффициентам  $K_{\text{ОТС}}$  отстройки ( $K_{\text{ОТС}} = 1,1 \div 1,2$ )

$$I_{\text{ср}} = K_{\text{ОТС}} \cdot |I_{\text{НБМ}}|. \quad (1)$$

Примем с запасом  $I_{\text{НБМ}} = 0,2 \cdot I_{\text{РАБ.МАКС}}$ , аналогично тому, как это делается в защитах, реагирующих на токи обратной последовательности.

**Логическая часть защиты.** Защита запускается через время  $t_1 = 0,15$  с после включения выключателей всех фаз (с помощью РПВ – реле положения выключателя), чтобы ИО не сработал из-за несимметрии, вызванной их одновременным включением. Сигнал от ИО задерживается на время  $t_2 = 0,05$  с для несрабатывания защиты при появлении помех в цепях трансформаторов тока, и после задержки на  $t_2$  запоминается на время  $t_3 = t_{\text{сз}} + t_{\text{откл}} + \Delta t_1$  и на  $t_4 = t_1 + t_2 + t_3 + t_{\text{вкл}} + t_{\text{АПВ}} + t_{\text{п}} + \Delta t_2$ , где  $t_{\text{сз}}$  и  $t_{\text{АПВ}}$  – выдержки времени защиты и устройства автоматического повторного включения (УАПВ) выбираются как у традиционных резервных защит и УАПВ;  $t_{\text{откл}}$  и  $t_{\text{вкл}}$  – наибольшие из времен отключения и включения выключателей фаз;  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – время запаса.

Запоминание на  $t_3$  необходимо, т.к. при двухфазном КЗ за трансформатором, например в точке К1 (рис.1), какой-то из токов  $|I_{p1}|, |I_{p2}|, |I_{p3}|$  будет больше  $I_{\text{ср}}$  только в течение  $t_{\text{п}} = 0,1$  с (то есть до тех пор, пока токи повреждения на текущий момент и токи предшествующего режима различаются), и время  $t_{\text{сз}}$  (обычно  $t_{\text{сз}} = 1-3$  с) никогда не будет набрано. Запоминание на  $t_4$  обеспечивает срабатывание ИО при включении защищаемой линии  $W_1$  от УАПВ на устойчивое двухфазное КЗ за трансформатором (точки К1 или К5, рис.1). Дело в том, что через  $0,15$  с после включения  $W_1$  ток КЗ уже установился и равен току КЗ через  $t_{\text{п}} = 0,1$  с, и ИО не сработает. Для его срабатывания надо сравнивать значение тока через  $t_1 + t_{\text{вкл}}$  после сигнала о срабатывании УАПВ с током, протекающим в фазах за время  $t_4$  до этого момента (то есть вместо  $t_{\text{п}}$  использовать  $t_4$ ). Этот сигнал запоминается и выдается через время  $t_5 = t_{\text{вкл}} + t_1 + \Delta t_3$ , ( $\Delta t_3$  – время запаса). Затем вводятся данные о токах после АПВ (рис.2).

Для того, чтобы исключить излишнюю работу защиты при скачкообразных увеличениях тока в  $W_1$  ИО не отстраивается от небалансов при самозапуске электродвигателей, питающихся от трансформаторов Т1 и Т2 (рис.1), при подключении и отключении их нагрузки и качаниях на транзитных линиях, введена блокировка РМ (рис. 2) по направлению мощности обратной последовательности. Она предотвращает излишнюю работу в различных несимметричных режимах, например при внешнем

двухфазном КЗ в точке  $K2$  или удаленной точке  $K3$ , когда на линии  $W1$  появится продольная несимметрия, или при работе УАПВ, включая однофазные (ОАПВ). Однако при двустороннем питании и работе двумя фазами после ОАПВ на устойчивое однофазное КЗ необходимо блокировать защиту по сигналам  $B1$  от реле РПВ с противоположной стороны защищаемой линии  $W1$  и по сигналам  $B2, B3, B4$  от РПВ других линий (рис.1). Последнее обстоятельство пока будет сдерживать применение защиты на линиях напряжением 220кВ и выше с двусторонним питанием.

**Оценка чувствительности.** Определим, какие минимальные токи  $I_{КМИН}$  короткого замыкания за трансформатором сможет выявлять защита, работающая по предложенному алгоритму. Для этого воспользуемся известной формулой [5]:  $K_{\text{Ч}} = I_P / I_{\text{СР}}$ , где  $K_{\text{Ч}}$  – коэффициент чувствительности токовых защит. В нашем случае  $I_P$  – наибольший из токов  $|I_{P1}|, |I_{P2}|, |I_{P3}|$  в ИО при  $I_{КМИН}$ . Найдем  $I_{КМИН}$ . В режиме двухфазного КЗ, например между фазами  $B$  и  $C$ , за трансформатором ответвления, ВЛ продолжает нести нагрузку, т.к. по ВЛ при этом КЗ протекает ток  $(0,1 \div 0,3) I_{\text{РАБМАКС}}$  плюс ток нагрузки (без тока нагрузки повредившегося трансформатора), что, практически, не понижает напряжение на шинах, от которых питается ВЛ. Кроме того, в фазе  $C$  со стороны внешнего напряжения трансформатора с соединением звезда-треугольник (а другие, как правило, не используются) составляющая тока КЗ в 2 раза больше, чем в двух других, и направлена противоположно им [5]. В результате через ТА фаз  $A, B, C$  линии  $W_1$  протекают токи  $\bar{I}_A^K = \bar{I}_{HA}^K - \bar{I}_K, \bar{I}_B^K = \bar{I}_{HB}^K - \bar{I}_K, \bar{I}_C^K = \bar{I}_{HC}^K + 2 \cdot \bar{I}_K$ , где  $\bar{I}_K$  — ток КЗ. Тогда разности между токами фаз в ИО определяются так:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{HAB}^K &= (\bar{I}_{HA}^K - \bar{I}_K) - (\bar{I}_{HB}^K - \bar{I}_K) = (\bar{I}_{HA}^{\text{ПР}} - \bar{I}_{HA}^{\text{Д}}) - (\bar{I}_{HB}^{\text{ПР}} - \bar{I}_{HB}^{\text{Д}}), \\ \bar{I}_{HBC}^K &= (\bar{I}_{HB}^K - \bar{I}_K) - (\bar{I}_{HC}^K + 2 \cdot \bar{I}_K) = (\bar{I}_{HB}^{\text{ПР}} - \bar{I}_{HB}^{\text{Д}}) - (\bar{I}_{HC}^{\text{ПР}} - \bar{I}_{HC}^{\text{Д}}) - 3 \cdot \bar{I}_K, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{I}_{HA}^K, \bar{I}_{HB}^K, \bar{I}_{HC}^K$  и  $\bar{I}_{HA}^{\text{Д}}, \bar{I}_{HB}^{\text{Д}}, \bar{I}_{HC}^{\text{Д}}$  – вектора токов нагрузки в фазах  $A, B, C$  линии при рассматриваемом КЗ и трансформатора до этого КЗ.

Найдя по второму пункту алгоритма разности  $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}, \bar{I}_{CA}$  между токами фаз  $A, B, C$  в момент КЗ и этими же токами в до аварийном режиме, например  $\bar{I}_{BC} = \bar{I}_{HBC}^K - \bar{I}_{HBC}^{\text{ПР}} = -3 \cdot \bar{I}_K + \bar{I}_{HC}^{\text{Д}} - \bar{I}_{HB}^{\text{Д}}$ , после вычитания по пункту 3 алгоритма получаем токи  $\bar{I}_{P1}, \bar{I}_{P2}, \bar{I}_{P3}$ , наибольший из которых

$$\bar{I}_{P2} = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} = 6 \cdot \bar{I}_K - 3 \cdot \bar{I}_{HC}^{\text{Д}}. \quad (3)$$

При двухфазном КЗ, например между фазами  $B$  и  $C$  линии, через ТА фаз  $A, B, C$  протекают токи  $\bar{I}_A^K = 0, \bar{I}_B^K = -\bar{I}_K, \bar{I}_C^K = \bar{I}_K$ , где  $\bar{I}_K$  – ток при КЗ на линии. Определим ток  $\bar{I}_{P2}^{\text{Л}}$ , считая, что ток в фазах  $W1$  до аварийного режима равен  $I_{\text{РАБМАКС}}$ , т.к. защита должна быть чувствительной и в этом случае:

$$\bar{I}_{P2}^{\text{Л}} = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} = \bar{I}_K - \bar{I}_{HCA}^{\text{ПР}} + 2 \cdot \bar{I}_K + \bar{I}_{HBC}^{\text{ПР}} = 3 \cdot \bar{I}_K - 3 \cdot \bar{I} \quad (4)$$

Из формул  $K_{\text{Ч}}$  и (3), считая, что вектора  $\bar{I}_K$  и  $\bar{I}_{\text{НТР}}$  ( $\bar{I}_{\text{НТР}} = \bar{I}_{\text{НСТР}}$ ) находятся в фазе (это дает запас по чувствительности) и  $K_{\text{Ч}} = 1,2$  (минимально допустимая величина для резервных защит), заменяя  $I_K$  на  $I_{\text{КМИН}}$ , получаем:

$$I_{\text{КМИН}} \neq 0,2 \cdot \text{ОТС} I_{\text{НБМ}} + 0,5 \cdot \text{НТР}, \quad (5)$$

Аналогично для двухфазного КЗ на линии:

$$I_{\text{КМИН}}^{\text{Л}} \neq 0,4 \cdot \text{ОТС} \cdot \text{НБМ} + \text{РАБМАКС} \quad (6)$$

По характеристикам (рис. 3), построенным по (5) и (6), можно по мощности трансформатора ответвления и току  $I_{\text{РАБМАКС}}$  линии определить  $I_{\text{КМИН}}$ , который способна чувствовать защита при КЗ за этим трансформатором, если известны  $K_{\text{ОТС}} = 1,2$  и  $K_{\text{ОТС}} = 1,1$  (пунктирные линии) и  $I_{\text{НБМ}}^* = 0,1 \div 0,2$ . Индекс "\*" обозначает, что ток опнесен к  $I_{\text{РАБМАКС}}$ . При  $I_{\text{НТР}}^* = 0,1 \div 0,4$  и  $K_{\text{ОТС}} = 1,2$  имеем:  $I_{\text{КМИН}}^* = 0,1 \div 0,2$ ;  $I_{\text{КМИН}}^{\text{Л}*} = 1,1$ . Из рис. 3 видно, что при КЗ за трансформаторами предлагаемая защита практически всегда обладает более высокой чувствительностью к двухфазным КЗ, чем известные защиты, реагирующие на токи обратной последовательности (Прямая 1).

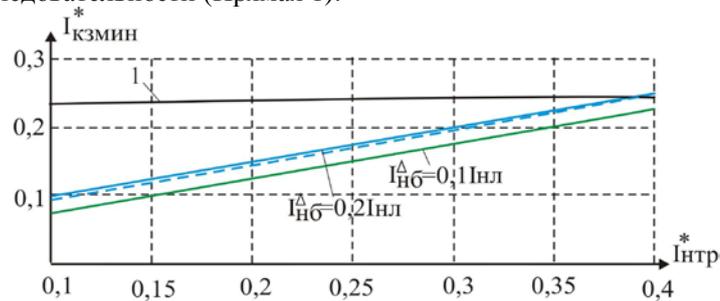


Рис. 3. Зависимости минимальных токов КЗ за трансформаторами ответвлений, которые способна выявлять защита, от их нагрузки

**Реализация.** Рассмотренный алгоритм ИО и блокировки не представляет трудностей для реализации на микропроцессорных терминалах. Реализация на статических реле, в том числе и с помощью операционных усилителей, едва ли целесообразна, не только в связи с современными тенденциями построения защит, но и из-за особенностей выполнения, связанных, как показало изготовление опытного образца, с громоздкостью линий задержки, необходимых для запоминания разностей векторов токов фаз на время  $t_{\text{П}} = 0,1\text{с}$  (не говоря уже о  $t_{\text{д}}$ ). Алгоритм и блокировки могут быть введены в известные программные защиты или реализованы в виде микропроцессорной приставки для статических защит.

**Выводы.** Разработанный алгоритм позволяет измерительным органам защиты (ИО), построенным на его основе, выявлять двухфазные КЗ за трансформаторами ответвлений, при которых токи в линии (без токов нагрузки) составляют  $(0,1 \div 0,2) I_{\text{РАБМАКС}}$ . Надежность срабатывания и несрабатывания защиты обеспечивается блокировками, введенными в ее логическую часть. Реализацию ИО и логической части целесообразно осуществлять на микропроцессорных терминалах.

### **Summary**

*The following algorithm of action of measuring body of reserve protection is offered: continuously differences vectors currents of phases A and B, B and C, C and A in these and previous timepoints are defined, these differences are subtracted the friend from the friend, and then — and their differences. It is shown that it provides the demanded sensitivity to two-phase short замыканиа behind low-power transformers branch. The blocking ensuring the correct functioning of protection in various modes are considered. The algorithm of logical part is presented. Difficulties of realization on static elements are noted and at bilateral food.*

*Keywords: the line with branches, short circuits, protection, sensitivity, a difference of currents.*

### **Литература**

1. Рубинчик В.А. Резервирование отключения коротких замыканий в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Богдан А.В., Клецель М.Я., Никитин К.И. Адаптивная резервная токовая защита тупиковых линий с ответвлениями // Электричество. 1991. №2.
3. Клецель М.Я., Никитин К.И. Резервная защита линий, реагирующая на разность модулей токов фаз и их приращения // Электричество. 1993. №10.
4. Нагай В.И. Релейная защита дальнего резервирования трансформаторов на ответвлениях ВЛ // Энергетик. 2001. №3. С.28-29.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1976. 560с.

*Поступила в редакцию*

*06 января 2015 г.*

*Зайцева Наталья Михайловна* – канд. техн. наук, профессор Инновационного евразийского университета, г.Павлодар, Казахстан. Тел: 8(718)255-60-53, 8(718)257-17-67 (+144).

*Клецель Марк Яковлевич* – д-р техн. наук, профессор Научного исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: asbizh@mail.ru.

*Никитин Константин Иванович* – д-р техн. наук Омского государственного технического университета. Тел: 8(902)9718927.

*Таронов Константин Сергеевич* – аспирант Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова, Казахстан. Тел: 8(718)254-50-50, 8(718)245-09-04.