

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.925

### Анализ работы дистанционной защиты ЛЭП с односторонним питанием при несимметричных коротких замыканиях за трансформатором «звезда-треугольник»

В.А. Шуин, М.С. Аль-Хомиди, В.В. Можжухина, Т.С. Фролова  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: vshuin@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В целях повышения эффективности дальнего резервирования при междуфазных коротких замыканиях на ЛЭП 110–220 кВ в большинстве случаев применяются дистанционные защиты. На чувствительность резервных ступеней дистанционных защит при несимметричных междуфазных коротких замыканиях за трансформаторами понизительных и ответвительных подстанций оказывает влияние множество факторов, основными из которых являются трансформация «звезда-треугольник» и переходное сопротивление в месте повреждения. Применяемые в настоящее время методики выбора уставок резервных ступеней дистанционной защиты не учитывают комплексное влияние указанных факторов на значение и угол сопротивления на зажимах защиты, что может приводить к непредусмотренным отказам их срабатывания. В связи с этим анализ особенностей функционирования резервных ступеней дистанционной защиты при междуфазных несимметричных коротких замыканиях за трансформаторами с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» представляет актуальную задачу для уточнения методики выбора уставок их срабатывания.

**Материалы и методы.** Для анализа влияния трансформации «звезда-треугольник» и переходного сопротивления в месте повреждения при несимметричных двухфазном и трехфазном коротких замыканиях использовано моделирование с применением аналитической и имитационной математических моделей.

**Результаты.** Получено аналитическое решение для реактивной и активной составляющих первичного сопротивления на зажимах дистанционной защиты при несимметричных двух- и трехфазном коротких замыканиях за трансформатором с наиболее широко применяемой группой соединения обмоток  $Y/\Delta-11$  через переходное сопротивление, достоверность которого проверена на имитационной модели в системе моделирования Simulink.

**Выводы.** Полученные аналитические выражения для активной и реактивной составляющих замера реле сопротивления при несимметричных коротких замыканиях через переходное сопротивление за трансформатором  $Y/\Delta-11$  позволяют уточнить методику выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит с различными характеристиками срабатывания на ЛЭП с односторонним питанием и увеличить их чувствительность.

**Ключевые слова:** ЛЭП высокого напряжения, междуфазные короткие замыкания, дальнее резервирование, дистанционные защиты, трансформация «звезда-треугольник», несимметричные короткие замыкания

### Operational analysis of distance protection on single power supply lines in case of unbalanced short-circuits in the secondary winding of the «wye-delta» phase displacement group transformer

V.A. Shuin, M.S. Al-Homidi, V.V. Mozhzhukhina, T.S. Frolova  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: rza@rza.ispu.ru

#### Abstract

**Background.** Distance protection is normally used to increase the efficiency of distant backup protection in case of phase-to-phase short circuits in 110–220 kV transmission lines. A host of factors influence the sensitivity of distance

protection backup stage in case of unbalanced phase-to-phase short-circuits in the secondary winding of step-down and branch stations, the main ones being the «star-delta» transformation and the transient resistance at the fault site. The currently used methods of estimating the actuation setpoints of distance protection backup stages do not take into account the complex effect of these factors on the resistance value and angle at the protection terminals, which can lead to unintended failures of protection equipment to operate. Therefore, an analysis of the performance features of distance protection backup stages for phase-to-phase unbalanced short-circuits in the secondary winding of «star-delta» transformers is an urgent problem aimed at making the actuation setpoint selection methods more exact.

**Materials and methods.** To analyze the influence of the «star-triangle» transformation and transient resistance at the fault site in case of unbalanced two-phase and three-phase short circuits, we used simulation by analytical and simulation mathematical models.

**Results.** An analytical solution has been obtained for the reactive and active components of primary resistance at distance protection terminals in case of unbalanced two-phase and three-phase resistive short circuits in the secondary winding of transformers with the most common «star-delta» winding group. The reliability of this solution was verified on a simulation model in the Simulink simulation system.

**Conclusions.** The obtained analytical expressions for the active and reactive components of resistance relay measurement in case of unbalanced resistive short-circuits in the secondary winding of «star-delta» transformers allows us to increase the accuracy and sensitivity of the methods of selecting the actuation setpoint of distance protection backup stages with different operating characteristics in single-side power supply transmission lines.

**Key words:** high-voltage power lines, phase-to-phase short circuits, distant backup protection, distance protection, «wye-delta» transformation, unbalanced short-circuits

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.5.039-045

**Введение.** На ЛЭП напряжением 110–220 кВ с односторонним питанием в качестве основных и резервных защит от междуфазных коротких замыканий (КЗ) применяются токовые или дистанционные защиты (ДЗ) со ступенчато-зависимыми характеристиками времени срабатывания [1]. Основной проблемой при применении указанных защит является обеспечение эффективности дальнего резервирования (ДР) при несимметричных КЗ за трансформаторами понизительных подстанций с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» (Y/Δ) [2–5].

Более эффективное решение в части ДР дает применение ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания. В соответствии с существующими методиками, параметры настройки полигональных характеристик резервных ступеней ДЗ – уставки по реактивной  $X_{с.з}$  и активной  $R_{с.з}$  составляющим комплексного сопротивления срабатывания  $Z_{с.з}$  на ЛЭП с односторонним питанием выбираются из условий отстройки от нагрузочных режимов без КЗ [6] и обеспечения требуемой чувствительности к металлическим КЗ и КЗ через переходное сопротивление  $R_{п}$  при повреждениях в конце зоны ДР [7, 8].

Однако в большинстве из практически применяемых в настоящее время методик расчета уставок резервных ступеней ДЗ не учитывается влияние трансформации Y/Δ и обусловленное ею различие влияний переходного сопротивления  $R_{п}$  при симметричных и несимметричных междуфазных КЗ. Анализ влияния трансформации Y/Δ на замер реле сопротивления (РС), включенных на междуфазные напряжения и разности соответствующих фазных токов («петли междуфазных КЗ»), при двухфазном КЗ за трансформатором с группой соединения обмоток Y/Δ-11 впервые рассмотрен в [9], однако в практических методиках расчета

уставок срабатывания ДЗ полученное в [9] аналитическое решение не использовалось.

В [6] приведены расчетные выражения для сопротивления на зажимах РС, включенных на «петли» междуфазных КЗ АВ, ВС и СА, при двухфазном КЗ  $K_{СА}^{(2)}$  за трансформатором Y/Δ-11, однако искажения замера РС за счет трансформации Y/Δ рассматриваются только в аспекте отстроенности РС II ступени ДЗ, имеющих характеристики срабатывания в форме окружности, от указанных внешних КЗ. Влияние трансформации Y/Δ на чувствительность III ступени ДЗ, предназначенной для ДР, в [6] не анализируется.

Конкретное расчетное выражение по выбору уставки по активной составляющей сопротивления срабатывания для РС III (резервной) ступени ДЗ с полигональными характеристиками, выполненной на базе микропроцессорных терминалов РЗА НПП «ЭКРА», учитывающее влияние трансформации Y/Δ-11 и сопротивление  $R_{п}$ , приведено в [7]. Однако в [7], как и в [6], рассматривается влияние указанных факторов только на замер РС основных (поврежденных) фаз и не учитывается, что при двухфазном КЗ за трансформатором Y/Δ-11 возможно также срабатывание еще одного РС, включенного на сочетание поврежденной и неповрежденной фаз (РС неосновных фаз), что обеспечило бы повышение эффективности ДР.

Отметим также, что в указанных выше работах не учитывается влияние трансформации Y/Δ на замер РС ДЗ ЛЭП при несимметричных трехфазных КЗ  $K_{ABC}^{(3)}$ , возникших, например, вследствие перекрытия электрической дугой двух крайних фаз А и С на среднюю В.

Учитывая изложенное, в целях уточнения методики выбора уставок резервной ступени ДЗ представляет интерес анализ влияния трансформации Y/Δ-11 и сопротивления  $R_{п}$  на

замер РС как для основных, так и неосновных фаз не только при двухфазных, но и при трехфазных несимметричных КЗ.

**Материалы и методы.** Для ЛЭП с односторонним питанием анализ влияния трансформации  $Y/\Delta$ -11 и сопротивления  $R_{\Pi}$  целесообразно выполнить на основе аналитического решения задачи. В [9] для получения аналитического решения для сопротивления на зажимах РС при двухфазном КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11 использован метод симметричных составляющих, что необходимо для учета возможного различия сопротивлений прямой и обратной последовательностей питающей системы. Учитывая, что для эквивалентированной системы различие сопротивлений прямой и обратной последовательности, как правило, можно пренебречь, рассмотрим аналитическое решение задачи определения замера ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием при двухфазном и при трехфазном несимметричном КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11 с использованием фазных составляющих, что упрощает сравнение результатов аналитического решения с результатами, полученными на имитационных трехфазных моделях ЛЭП, например, для проверки достоверности полученного аналитическим способом решения.

**Расчетные выражения для определения замера РС резервной ступени ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием при двухфазном КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11.** Схема замещения для определения токов и напряжений в месте установки ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием при двухфазном и несимметричном трехфазном КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11 приведена на рис. 1.

Примем допущение, что влиянием токов нагрузки в доаварийном (нормальном) режиме на замер РС ДЗ при КЗ за трансформатором можно пренебречь. Для упрощения расчетных выражений примем также, что коэффициент трансформации трансформатора  $N_T = 1$ , т.е. токи и напряжения и параметры элементов в расчетной трехфазной схеме замещения (рис. 1) приведены к стороне высшего напряжения (ВН) трансформатора.

Отметим, что при  $N_T = 1$  отношение числа витков обмоток трансформатора, соединен-

ных в «звезду» и «треугольник», определяется выражением

$$\frac{W_{\Delta}}{W_Y} = \sqrt{3}. \quad (1)$$

С учетом указанных выше допущений из схемы замещения по рис. 1 при  $K_{AC}^{(2)}$  на стороне низшего напряжения трансформатора после преобразований можно получить следующие соотношения для реактивной и активной составляющих замера РС, включенных соответственно на токи и напряжения «петель КЗ» фаз АВ, ВС и СА:

$$R_{AB} = R_{\Pi} + R_T + \frac{1}{2}R_{\Pi} - \frac{\sqrt{3}}{3}(X_C + X_{\Pi} + X_T); \quad (2)$$

$$X_{AB} = X_{\Pi} + X_T + \frac{\sqrt{3}}{3}(R_C + R_{\Pi} + R_T + \frac{1}{2}R_{\Pi}); \quad (3)$$

$$R_{CA} = R_{\Pi} + R_T + \frac{1}{2}R_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{3}(X_C + X_{\Pi} + X_T); \quad (4)$$

$$X_{CA} = X_{\Pi} + X_T - \frac{\sqrt{3}}{3}(R_C + R_{\Pi} + R_T + \frac{1}{2}R_{\Pi}); \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{U_{BC}}{\underline{I}_B - \underline{I}_C} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_A e^{-j90^\circ}}{0} \rightarrow \infty. \quad (6)$$

При симметричном металлическом трехфазном КЗ замеры всех трех РС равны и определяются выражениями:

$$R^{(3)} = R_{\Pi} + R_T; \quad (7)$$

$$X^{(3)} = X_{\Pi} + X_T; \quad (8)$$

Сравнение (2)–(5) и (7), (8) показывает, что искажение замера РС основных фаз СА и неосновных фаз АВ при двухфазном металлическом КЗ  $K_{AC}^{(2)}$  обусловлено прибавлением к вектору сопротивления на зажимах ДЗ при трехфазном КЗ  $Z^{(3)}$  дополнительных векторов  $\underline{Z}_{CA}$  и  $\underline{Z}_{AB}$  соответственно:

$$\underline{Z}_{CA}^{(2)} = \underline{Z}^{(3)} + \Delta \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}^{(3)} + \frac{\sqrt{3}}{3}(X_{\Sigma} - jR_{\Sigma}), \quad (9)$$

$$\underline{Z}_{AB}^{(2)} = \underline{Z}^{(3)} + \Delta \underline{Z}_{AB} = \underline{Z}^{(3)} - \frac{\sqrt{3}}{3}(X_{\Sigma} - jR_{\Sigma}); \quad (10)$$

где  $X_{\Sigma} = X_C + X_{\Pi} + X_T$ ;  $R_{\Sigma} = R_C + R_{\Pi} + R_T$ .

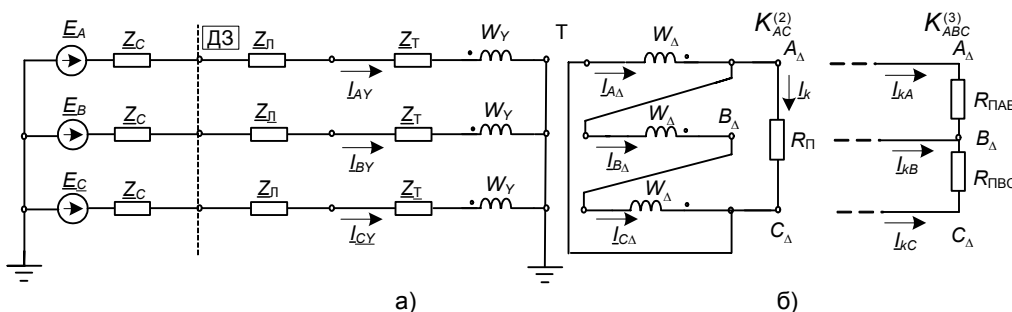


Рис. 1. Расчетная трехфазная схема замещения для определения токов и напряжений в месте установки ДЗ ЛЭП с односторонним питанием при двухфазном  $K_{AC}^{(2)}$  (а) и несимметричном трехфазном  $K_{ABC}^{(3)}$  (б) КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11

Дополнительные искажения замера вызывает также влияние переходного сопротивления  $R_{\Gamma}$  в месте повреждения. Влияние трансформации  $Y/\Delta$ -11 и переходного сопротивления  $R_{\Gamma}$  на замер ДЗ при  $K_{AC}^{(2)}$  иллюстрирует рис. 2,а.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $OAB_1C_1$  – характеристика срабатывания РС при выборе параметров срабатывания без учета влияния трансформации  $Y/\Delta$ -11;  $OAB_2C_2$  – характеристика срабатывания РС при выборе параметров срабатывания по известной методике [7]; 1 – замер РС  $Z^{(3)}$  при металлическом трехфазном КЗ за трансформатором; 2 и 3 –  $\Delta Z_{CA}$  и  $\Delta Z_{AB}$  соответственно; 4 и 5 – замеры РС основных и неосновных фаз  $Z_{CA}^{(2)}$  и  $Z_{AB}^{(2)}$  при металлическом двухфазном  $K_{CA}^{(2)}$  КЗ; 6 и 7 – искажения замеров  $Z_{CA}^{(2)}$  и  $Z_{AB}^{(2)}$  за счет влияния переходного сопротивления в месте повреждения; 8 и 9 – замеры РС основных и неосновных фаз  $Z_{CA}^{(2)}$  и  $Z_{AB}^{(2)}$  при двухфазном  $K_{CA}^{(2)}$  КЗ через расчетное переходное сопротивление; 10 – замер РС фаз ВС при несимметричном трехфазном КЗ через расчетное переходное сопротивление.

На рис. 2, а параметры характеристик срабатывания резервной ступени ДЗ, выполненной на базе шкафа типа ШЭ 2607 НПП «ЭКРА», и расчетные значения замеров РС, включенных на «петли КЗ» АВ и СА, получены для исходных данных, приведенных в таблице.

Уставка по реактивной составляющей сопротивления срабатывания  $X_{c.3}$  характеристик  $OAB_1C_1$  и  $OAB_2C_2$  выбрана из условия обеспечения требуемой чувствительности ( $K_{ч.мин} = 1,2$  [9]) к металлическим трехфазным КЗ за трансформатором. Уставки по активной составляющей сопротивления срабатывания  $R_{c.3.1}$  и  $R_{c.3.2}$  выбраны из условия обеспечения требуемой чувствительности к двухфазным КЗ через расчетное переходное сопротивление в месте повреждения [7, 8]:

$$R_{\Gamma} = R_{д} = \frac{2500 \cdot L_{д} K_{ув}}{I_{д}}, \quad (11)$$

где  $R_{д}$  – сопротивление электрической дуги в месте повреждения;  $L_{д}$  – длина дуги, определяемая расстоянием между поврежденными фазами;  $K_{ув}$  – коэффициент, учитывающий увеличение длины дуги за счет электродинамических усилий и ветра;  $I_{д}$  – ток дуги.

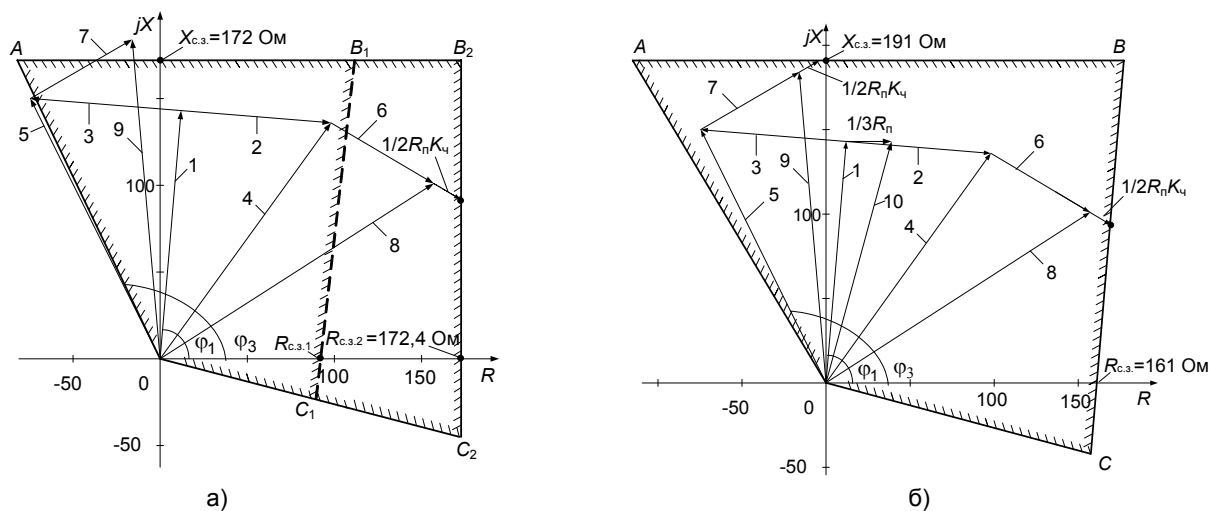


Рис. 2. Влияние трансформации «звезда-треугольник» и переходного сопротивления  $R_{\Gamma}$  на замер РС резервной ступени ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием при двухфазном КЗ  $K_{AC}^{(2)}$  за трансформатором  $Y/\Delta$ -11: а – при выборе параметров характеристики срабатывания РС по применяемым в настоящее время методикам; б – при выборе параметров характеристики срабатывания РС по предлагаемой методике

**Параметры элементов расчетной трехфазной схемы замещения (рис. 1)**

Система			ЛЭП			
$U_{НОМ}, \text{кВ}$	$I_k^{(3)}, \text{кА}$	$X/R$	$U_{НОМ}, \text{кВ}$	$L_{л}, \text{км}$	$X_{л}, \text{Ом}$	$R_{л}, \text{Ом}$
115	10	7	110	30	12,8	7,3
Трансформатор						
Тип	$S_{НОМ}, \text{МВА}$	$U_{ВН}, \text{кВ}$	$U_{НН}, \text{кВ}$	$U_k, \%$	$X_T, \text{Ом}$	$R_T, \text{Ом}$
ТДН-16000//110	16	115	11	10,5	86,7	4,4

Расчеты показывают, что при выборе  $R_{c.3}$  по указанному выше условию отстройка резервной ступени ДЗ от максимальных нагрузочных режимов ЛЭП напряжением 110 кВ с помощью правой границы  $B_1C_1$  ( $B_2C_2$ ) характеристики срабатывания обеспечивается при суммарной мощности трансформаторов, питаемых по защищаемой ЛЭП,  $S_{\Sigma \text{ ном}} < \sim 25$  МВА. При большей мощности трансформаторов расчетным условием для выбора уставки  $R_{c.3}$  является отстройка от нагрузочных режимов, что приводит к уменьшению чувствительности резервной ступени ДЗ к КЗ через переходное сопротивление.

При выборе уставки по активной составляющей сопротивления срабатывания  $R_{c.3.1}$  без учета влияния трансформации  $Y/\Delta$  (характеристика срабатывания  $OAB_1C_1$ ) из условия

$$R_{c.3} \geq K_{\text{ч.мин}} \frac{R_{\Pi}}{2} \quad (12)$$

РС основных фаз СА не обеспечивает требуемую чувствительность к двухфазным КЗ через расчетное переходное сопротивление (рис. 2,а, вектор 8). РС неосновных фаз АВ в этом случае нечувствительно как к металлическим двухфазным КЗ, так и к КЗ через расчетное переходное сопротивление (рис. 2,а, векторы сопротивлений 5 и 9).

Для характеристики срабатывания  $OAB_2C_2$  уставка по активной составляющей сопротивления срабатывания  $R_{c.3.2}$  выбрана с учетом влияния трансформации  $Y/\Delta$  по выражению [7]

$$R_{c.3} \geq \text{Re} \left( \frac{2(\underline{Z}_{\text{Л}} + \underline{Z}_{\text{Т}} + 1,2R_{\Pi})e^{-j30} + \underline{Z}_{\text{С}}e^{-j90}}{\sqrt{3}} \right). \quad (13)$$

Из (13) после преобразований можно получить

$$R_{c.3} \geq R_{\text{Л}} + R_{\text{Т}} + K_{\text{ч.мин}} \frac{1}{2} R_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{3} X_{\Sigma}, \quad (14)$$

где  $K_{\text{ч.мин}} = 1,2$  [9].

При выборе уставки  $R_{c.3.2}$  в соответствии с рекомендациями [7] по (14) параметры характеристики срабатывания позволяют обеспечить чувствительность РС основных фаз СА как при металлических, так и при двухфазных КЗ через расчетное переходное сопротивление (рис. 2,а, векторы 4 и 8). Однако РС неосновных фаз АВ для характеристики срабатывания  $OAB_2C_2$ , как и для характеристики срабатывания  $OAB_1C_1$ , остается нечувствительным как к металлическим двухфазным КЗ, так и к КЗ через расчетное переходное сопротивление (рис. 2,а, векторы 5 и 9).

**Метод повышения чувствительности резервной ступени ДЗ с полигональной характеристикой срабатывания.** Как уже отмечалось выше, при достаточно больших перетоках мощности по ЛЭП 110 кВ, превышающих  $\sim 25$  МВА, и отстройке резервной ступени ДЗ от сопротивления на зажимах защиты в макси-

мальных нагрузочных режимах с помощью правой границы характеристики срабатывания (рис. 2,а,  $B_1C_1$ ,  $B_2C_2$ ) или выреза сектора нагрузки, РС основных фаз не всегда может обеспечить требуемую чувствительность к двухфазным КЗ через расчетное переходное сопротивление. В указанных условиях повышение эффективности дальнего резервирования при двухфазных КЗ за трансформаторами  $Y/\Delta$  возможно за счет РС неосновных фаз АВ при увеличении уставки резервной ступени ДЗ по реактивной составляющей сопротивления срабатывания  $X_{c.3}$  и угла наклона  $\varphi_3$  левой границы характеристики срабатывания (рис. 2,а). Расчетные соотношения для выбора указанных уставок срабатывания могут быть получены на основе выражений (2) и (3):

$$X_{c.3} \geq K_{\text{ч.мин}} \left[ X_{\text{Л}} + X_{\text{Т}} + \frac{\sqrt{3}}{3} (R_{\Sigma} + \frac{1}{2} R_{\Pi}) \right]; \quad (15)$$

$$\varphi_3 \geq 90^\circ + \frac{180}{\pi} \arctg \frac{\frac{\sqrt{3}}{3} X_{\Sigma} - (R_{\text{Л}} + R_{\text{Т}})}{X_{\text{Л}} + X_{\text{Т}} + \frac{\sqrt{3}}{3} R_{\Sigma}} + \Delta\varphi, \quad (16)$$

где  $\Delta\varphi$  учитывает погрешности функционирования, которые могут привести к уменьшению замера по углу  $\varphi_3$  (в [6, 7] рекомендуется принимать  $\Delta\varphi = 5-7^\circ$ ).

Согласно (15), по сравнению с обычно принимаемым значением, выбранным из условия чувствительности к металлическим трехфазным КЗ, уставка  $X_{c.3}$  должна быть увеличена на величину

$$\Delta X_{c.3} = K_{\text{ч.мин}} \left( \frac{\sqrt{3}}{3} R_{\Sigma} + \frac{1}{2} R_{\Pi}' \right). \quad (17)$$

Уставку по углу  $\varphi_3$  для ДЗ шкафа ШЭ 2607 НПП «ЭКРА» рекомендует принимать равной  $115^\circ$  [7, 8]. Расчеты по (16) показывают, что для обеспечения устойчивых срабатываний РС неосновных фаз при металлических двухфазных КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$  (например, рис. 2,а, вектор 5) уставку по углу  $\varphi_3$  необходимо увеличить до  $\sim 125-135^\circ$ .

Уставка по активной составляющей сопротивления срабатывания, как и в рассмотренном выше случае, должна выбираться из условия обеспечения требуемой чувствительности к двухфазным КЗ за трансформатором через расчетное переходное сопротивление. Однако, в отличие от рекомендованного в [7] расчетного выражения (13) и полученного из него (14), более корректным при выборе уставки  $R_{c.3}$ , на наш взгляд, является выражение, представленное в форме, аналогичной выражению (15), т.е.

$$R_{c.3} \geq K_{\text{ч.мин}} \left( R_{\text{Л}} + R_{\text{Т}} + \frac{1}{2} R_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{3} X_{\Sigma} \right). \quad (18)$$

Принципиальное отличие (18) от (14) заключается в том, что в (18) коэффициент  $K_{\text{ч.мин}}$

учитывает не только погрешности, обусловленные влиянием  $R_{\Pi}$ , но и другие погрешности замера резервной ступени ДЗ как по активной, так и по реактивной составляющим сопротивления на зажимах РС, что обеспечивает повышение устойчивости ее функционирования.

На рис. 2,б в качестве примера приведена характеристика срабатывания РС резервной ступени ДЗ  $OABC$  с параметрами срабатывания  $X_{c.3}$ ,  $R_{c.3}$  и  $\varphi_3$ , выбранными по предлагаемой методике, т.е. по выражениям (15)–(18). Все расчетные векторы, соответствующие сопротивлениям на зажимах РС основных и неосновных фаз, как при металлических КЗ, так и при КЗ через расчетное переходное сопротивление (рис. 2,б, векторы 1, 4, 5, 8, 9) находятся в области срабатывания.

**Влияние трансформации «звезда-треугольник» на замер дистанционной защиты на ЛЭП с односторонним питанием при трехфазном несимметричном КЗ за трансформатором.** Трехфазные несимметричные  $K_{ABC}^{(3)}$  КЗ возникают как перекрытие электрической дугой двух крайних фаз  $A$  и  $C$  на среднюю фазу  $B$  (см. рис. 1,б). Примем, что  $R_{\Pi AB} = R_{\Pi BC} = R_{\Pi}$ . С учетом указанного допущения из схемы замещения по рис. 1 при  $K_{ABC}^{(3)}$  получим следующие соотношения для замера РС, включенных соответственно на токи и напряжения «петель КЗ» фаз  $AB$ ,  $BC$  и  $CA$ :

$$Z_{AB} = \frac{(1 + e^{j60^\circ})(Z_{\Sigma} + R_{\Pi})\left(Z_{\Sigma} + \frac{1}{3}R_{\Pi}\right)}{2Z_{\Sigma} + R_{\Pi} - e^{-j60^\circ}(Z_{\Sigma} + R_{\Pi})} - Z_C; \quad (19)$$

$$Z_{BC} = Z_{\Pi} + Z_T + \frac{R_{\Pi}}{3}; \quad (20)$$

$$Z_{CA} = \frac{(e^{j120^\circ} - 1)(R_{\Pi} + Z_{\Sigma})\left(Z_{\Sigma} + \frac{1}{3}R_{\Pi}\right)}{-2Z_{\Sigma} - R_{\Pi} + e^{j60^\circ}(R_{\Pi} + Z_{\Sigma})} - Z_C. \quad (21)$$

Достоверность полученных аналитических выражений проверена на имитационной модели. Из (19)–(21) можно видеть, что при несимметричном трехфазном КЗ наибольшую чувствительность обеспечивает РС неосновных фаз, включенное на «петлю»  $BC$ , в замер которого входит только треть переходного сопротивления  $R_{\Pi}$ . Чувствительность резервной ступени ДЗ при трехфазных несимметричных КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$  всегда существенно больше, чем при несимметричных двухфазных КЗ (рис. 2,б, вектор 10).

**Результаты.** Получены аналитические выражения для определения активной и реактивной составляющих замера резервной ступени ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием при несимметричных двухфазных и трехфазных КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11 через переходное сопротивление.

Показано, что расчетным по условию обеспечения чувствительности резервной ступени ДЗ на ЛЭП с односторонним питанием к несимметричным КЗ за трансформатором с группой соединения обмоток «звезда-треугольник», как металлическим, так и через переходное сопротивление, является двухфазное КЗ.

Предложена методика выбора уставок резервной ступени ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания на ЛЭП с односторонним питанием, обеспечивающая повышение эффективности дальнего резервирования при двухфазных КЗ за трансформатором  $Y/\Delta$ -11 за счет повышения чувствительности РС основных и неосновных фаз.

**Выводы.** Предложенные уточнения методики выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит с полигональными характеристиками срабатывания высоковольтных ЛЭП с односторонним питанием позволяют повысить эффективность дальнего резервирования в электрических сетях напряжением 110–220 кВ при несимметричных междуфазных коротких замыканиях за трансформаторами понижающих и ответвительных подстанций.

#### Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. **Нагай И.В., Нагай В.И.** Проблемы и решения дальнего резервирования трансформаторов ответвительных и промежуточных подстанций // Релейщик. – 2009. – № 4. – С. 30–35.
3. **Нагай И.В.** Дальнее резервирование в сетях 6–110 кВ. Проблемы и решения // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – 6(66). – С. 28–30.
4. **Нагай В.И.** Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
5. **Нагай В.И., Маруда И.Ф., Нагай В.В.** Резервирование релейной защиты и коммутационных аппаратов электрических распределительных сетей. – Ростов н/Д.: Изд-во журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион», 2009. – 316 с.
6. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.
7. **Методические** указания по расчету и выбору параметров настройки (уставок) микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики производства ООО НПП «ЭКРА», «АББ», «GE Multilin» и «Alstom grid»/«Areva» для воздушных и кабельных линий с односторонним питанием напряжением 110–330 кВ. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2015.
8. **Рекомендации** по расчету уставок резервных защит ЛЭП ВН на базе шкафов НПП «ЭКРА». – Чебоксары, НПП «ЭКРА»: Версия 12. 2014. – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ekra.ru/dokumentaciya/rz-podstancionnogo-oborudovanija-110-220-kv-doc/>.
9. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.

## References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electric power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 520 p.
2. Nagay, I.V., Nagay, V.I. Problemy i resheniya dal'nego rezervirovaniya transformatorov otvetitel'nykh i promezhutochnykh podstantsiy [Problems and solutions for remote backup of transformers of branch and intermediate substations]. *Releynshchik*, 2009, no. 4, pp. 30–35.
3. Nagay, I.V. Dal'nee rezervirovanie v setyakh 6–110 kV. Problemy i resheniya [Remote back-up in 6–110 kV networks. Problems and solutions]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2010, no. 6(66), pp. 28–30.
4. Nagay, V.I. *Releynaya zashchita otvetitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey* [Relay protection of branch stations of electrical networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2002. 312 p.
5. Nagay, V.I., Maruda, I.F., Nagay, V.V. *Rezervirovanie releynoy zashchity i kommutatsionnykh apparatov elektricheskikh raspredelitel'nykh setey* [Backup relay protection and switching devices of electric distribution networks]. Rostov-on-Don: Izdatel'stvo zhurnala «Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region», 2009. 316 p.
6. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 7. Dstantsionnaya zashchita liniy 35–330 kV* [Guidelines for relay protection. Issue 7. Remote protection of 35–330 kV lines]. Moscow: Energiya, 1966. 172 p.
7. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu i vyboru parametrov nastroyki (ustavok) mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki proizvodstva OOO NPP «EKRA», «ABB», «GE Multilin» i «Alstom grid»/«Areva» dlya vozduzhnykh i kabel'nykh liniy s odnostoronnim pitaniem napryazheniem 110–330 kV* [Guidelines for the calculation and selection of the settings (actuation setpoint) of microprocessor relay protection and automation equipment produced by EKRA Research and Production Enterprise Ltd, ABB, GE Multilin and Alstom grid / Areva for air and cable lines with 110–330 kV single-side voltage supply]. Moscow: OAO «FSK EES», 2015.
8. *Rekomendatsii po raschetu ustavok rezervnykh zashchit LEP VN na baze shkafov NPP «EKRA»* [Recommendations for calculating the settings of backup protection of high voltage transmission lines using cabinets produced by EKRA Research and Production Enterprise Ltd]. Cheboksary, NPP «EKRA»: Versiya 12. 2014. – Cheboksary: OOO NPP «EKRA». Available at: <http://www.ekra.ru/dokumentaciya/rza-podstancionnogo-oborudovaniya-110-220-kv-doc/>.
9. Atabekov, G.I. *Teoreticheskie osnovy releynoy zashchity vysokovol'tnykh setey* [Theoretical bases of relay protection of high-voltage networks]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1957. 344 p.

*Шуин Владимир Александрович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,  
телефон (4932) 26-99-06,  
e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Shuin Vladimir Aleksandrovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor of the Electric Power Systems Automatic Control  
Department,  
tel.: (4932) 26-99-06,  
e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Аль-Хомиди Марван Саид,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук,  
e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Al-Homidi Marvan Said,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD),  
e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Можжухина Виктория Владимировна,*

ООО «ВиВа Энерго»,  
инженер,  
телефон (4932) 26-99-06,  
e-mail: mvv277@gmail.com

*Mozhzhukhina Viktoria Vladimirovna,*

ООО «ViVa Energo»,  
engineer,  
tel.: (4932) 26-99-06,  
e-mail: mvv277@gmail.com

*Фролова Татьяна Сергеевна,*

ООО «ЭнергоСетьПроект», Обособленное подразделение г. Иваново,  
инженер 2 категории, магистр,  
e-mail: rza@rza.ispu.ru

*Frolova Tatyana Sergeevna,*

ООО «EnergoSetProyekt», a separate subdivision in Ivanovo City,  
Second Grade Engineer, Master Course student,  
e-mail: rza@rza.ispu.ru