



## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21) 2022/0285.1

(22) 12.05.2022

(45) 30.06.2023, бюл. №26

(72) Клецель Марк Яковлевич; Машрапов Бауыржан Ерболович; Машрапова Гульнара Наримановна

(73) Некоммерческое акционерное общество «Торайгыров университет»

(56) RU 2574038 C2, 27.01.2016;

RU 2383095 C1, 27.02.2010;

KZ 20853 A4, 16.02.2009;

KZ 18935 A, 15.11.2007.

(54) **ФИЛЬТР ТОКА ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С ТОКОПРОВОДАМИ ФАЗ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПО ВЕРШИНАМ РАВНОСТОРОННЕГО ТРЕУГОЛЬНИКА**

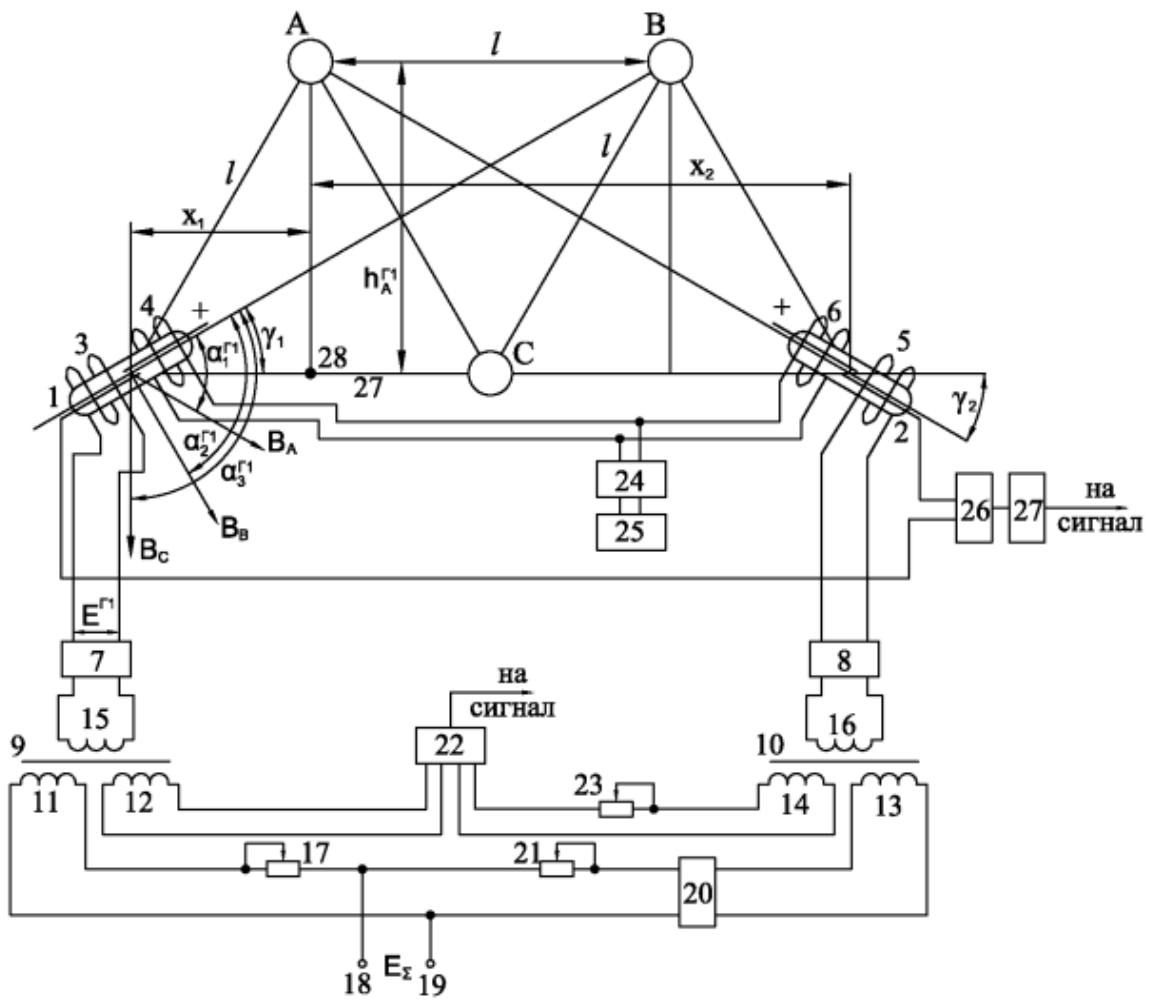
(57) Изобретение относится к электротехнике, а именно к технике релейной защиты, и может быть использовано для выявления токов обратной последовательности без применения трансформаторов тока.

Технический результат – повышение чувствительности к трехфазным коротким замыканиям и выявление неисправностей в процессе функционирования.

Фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, содержащий первую и вторую обмотки, первый и второй резисторы и выходные зажимы, первый и второй усилители, фазоповоротную схему, первый и второй герконы, установленные на безопасном расстоянии от токопроводов фаз электроустановки так, что продольная ось первого геркона совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы А с токопроводом фазы В и токопровод фазы В с токопроводом фазы С в плоскости поперечного сечения токопроводов, а продольная ось второго геркона – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы В с токопроводом фазы А и токопровод фазы

А с токопроводом фазы С в этой плоскости, причем первая обмотка намотана на первый геркон, вторая – на второй геркон, входы первого усилителя подключены к первой обмотке, входы второго – ко второй, один вывод первого резистора подключен к первому выходному зажиму, к которому через второй резистор подключен один вывод фазоповоротной схемы, другой выход которой подключен к второму выходному зажиму, третья обмотка, надетая на первый геркон, и четвертая обмотка, надетая на второй геркон, причем выводы третьей и четвертой обмоток подключены к выходам блока регулирования напряжения, входы которого подключены к источнику постоянного напряжения, первый и второй разделительные трансформаторы с двумя вторичными обмотками подключены первичными обмотками к выходам первого и второго усилителей, первая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора одним выводом подключена к свободному выводу первого резистора, а вторым – к второму выходному зажиму, первая первичная обмотка второго разделительного трансформатора подключена к входам фазоповоротной схемы, вторая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора подключена к первым входам нуля индикатора, вторая вторичная обмотка второго разделительного трансформатора через третий резистор подключена к вторым входам нуля индикатора, выход которого подключен в цепь сигнализации, контакты первого и второго герконов подключены к входам элемента ИЛИ и к логической части защиты от трехфазных коротких замыканий, реле времени входом подключено к выходу элемента ИЛИ, а выходом в цепь сигнализации.

Экономический эффект - предлагаемый фильтр тока обратной последовательности позволяет выявлять токи двухфазного и трехфазного коротких замыканий без использования трансформаторов тока, а также уменьшить ущерб от несрабатывания или ложного срабатывания фильтра за счет своевременного выявления неисправностей в нем.



Фиг. 1

Изобретение относится к электротехнике, а именно к технике релейной защиты, и может быть использовано для выявления токов обратной последовательности без применения трансформаторов тока.

Известен фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника [Н.В. Чернобровов. Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – С. 800], содержащий трехобмоточный трансреактор, первичные обмотки которого подключены к трансформаторам тока фаз А и С, активное сопротивление и двухобмоточный трансформатор, подключенные параллельно вторичной обмотке трансреактора.

Однако этот фильтр имеет ряд недостатков: плохой информационный порог чувствительности, характеризующий уровень помех на выходе, и инерционность, обусловленную большой мощностью, потребляемой трансреактором от измерительных трансформаторов тока.

Наиболее близким к предлагаемому является фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника [Патент № 2574038 RU, опубл. 27.01.2016, бюл. № 3], содержащий первую и вторую обмотки, первый и второй резисторы и выходные зажимы, первый и второй усилители, фазоповоротную схему, первый и второй герконы, установленные на безопасном расстоянии от токопроводов фаз электроустановки так, что продольная ось первого геркона совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы А с токопроводом фазы В и токопровод фазы В с токопроводом фазы С в плоскости поперечного сечения токопроводов, а продольная ось второго геркона – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы В с токопроводом фазы А и токопровод фазы А с токопроводом фазы С в этой плоскости, причем первая обмотка намотана на первый геркон, вторая – на второй геркон, входы первого усилителя подключены к первой обмотке, входы второго – ко второй, один вывод первого резистора подключен к первому выходному зажиму, к которому через второй резистор подключен один вывод фазоповоротной схемы, другой выход которой подключен к второму выходному зажиму.

Недостатком этого фильтра являются невозможность выявления неисправностей его элементов, и низкая чувствительность к токам трехфазного короткого замыкания.

Технический результат – повышение чувствительности к трехфазным коротким замыканиям и выявление неисправностей в процессе функционирования.

Технический результат достигается тем, что в фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, содержащий первую и вторую

обмотки, первый и второй резисторы и выходные зажимы, первый и второй усилители, фазоповоротную схему, первый и второй герконы, установленные на безопасном расстоянии от токопроводов фаз электроустановки так, что продольная ось первого геркона совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы А с токопроводом фазы В и токопровод фазы В с токопроводом фазы С в плоскости поперечного сечения токопроводов, а продольная ось второго геркона – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы В с токопроводом фазы А и токопровод фазы А с токопроводом фазы С в этой плоскости, причем первая обмотка намотана на первый геркон, вторая – на второй геркон, входы первого усилителя подключены к первой обмотке, входы второго – ко второй, один вывод первого резистора подключен к первому выходному зажиму, к которому через второй резистор подключен один вывод фазоповоротной схемы, другой выход которой подключен к второму выходному зажиму, дополнительно введены третья обмотка, надетая на первый геркон, и четвертая обмотка, надетая на второй геркон, причем выводы третьей и четвертой обмоток подключены к выходам блока регулирования напряжения, входы которого подключены к источнику постоянного напряжения, первый и второй разделительные трансформаторы с двумя вторичными обмотками подключены первичными обмотками к выходам первого и второго усилителей, первая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора одним выводом подключена к свободному выводу первого резистора, а вторым – к второму выходному зажиму, первая первичная обмотка второго разделительного трансформатора подключена к входам фазоповоротной схемы, вторая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора подключена к первым входам нуля индикатора, вторая вторичная обмотка второго разделительного трансформатора через третий резистор подключена к вторым входам нуля индикатора, выход которого подключен в цепь сигнализации, контакты первого и второго герконов подключены к входам элемента ИЛИ и к логической части защиты от трехфазных коротких замыканий, реле времени входом подключено к выходу элемента ИЛИ, а выходом в цепь сигнализации.

На фиг.1 представлена схема фильтра тока обратной последовательности.

Фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника содержит (фиг.1) герконы 1 и 2 с обмотками 3, 4 и 5, 6. Усилители 7 и 8 подключены к обмоткам 3 и 5. Разделительные трансформаторы 9 и 10 с вторичными обмотками 11, 12 и 13, 14 подключены первичными обмотками 15 и 16 к усилителям 7 и 8. Вторичная обмотка 11 разделительного трансформатора 9 через резистор 17 подключена к выходным зажимам 18 и 19, к которым через фазоповоротную схему 20 и резистор

21 подключена вторичная обмотка 13 разделительного трансформатора 10. Вторичная обмотка 12 разделительного трансформатора 9 подключена к нулю индикатору 22. Вторичная обмотка 14 разделительного трансформатора 10 через резистор 23 подключена к нулю индикатору 22, выход которого подключен в цепь сигнализации. Блок 24 регулирования напряжения входами подключен к источнику 25 постоянного напряжения, а выходами к обмоткам 4 и 6. Контакты герконов 1 и 2 подключены к входам элемента ИЛИ 26 и к логической части защиты (на фиг. 1 не показана) от трехфазных коротких замыканий. Реле времени 27 входом подключено к выходу элемента ИЛИ 26, а выходом в цепь сигнализации.

Герконы установлены вблизи токопроводов фаз А, В, С, расположенных по вершинам треугольника, на безопасном расстоянии так, что продольная ось первого геркона совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы А с токопроводом фазы В и токопровод фазы В с токопроводом фазы С в плоскости поперечного сечения токопроводов, а продольная ось второго геркона – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопроводы фаз В с токопроводом фазы А и токопровод фазы А с токопроводом фазы С в этой плоскости. Их положение определяется расстояниями  $h_A^{\Gamma 1} = h_B^{\Gamma 1} = h_A^{\Gamma 2} = h_B^{\Gamma 2}$  и  $h_C^{\Gamma 1} = h_C^{\Gamma 2} = 0$  от горизонтальной линии 27, проходящей через фазу С и центры тяжести герконов, до токопроводов, а также расстояниями  $x_1, x_2$  от точки 28 пересечения вертикали, проходящей через токопровод фазы А и линию 27, до центров тяжести герконов 1, 2, соответственно, и углами  $\gamma_1, \gamma_2$  между линией 27 и продольными осями герконов. Расстояние  $x_1$  ( $x_2$ ) и угол  $\gamma_1$  ( $\gamma_2$ ) выбираются так, чтобы на геркон 1 (2) действовало магнитное поле, созданное током только фазы А и С (В и С). Для того чтобы это сделать рассмотрим выражение для соответствующей индукции  $B_{np}$  магнитного поля, действующей на геркон 1 вдоль его продольной оси

$$B_{np} = B_A \cos \alpha_1 + B_B \cos \alpha_2 + B_C \cos \alpha_3 = \mu_0 (g_A I_A + g_B I_B + g_C I_C) / 2\pi, \quad (1)$$

где  $B_A, B_B, B_C$  – индукции магнитных полей в месте установки геркона от токов фаз А, В, С;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы между осью геркона и  $B_A, B_B, B_C$ , соответственно;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $I_A, I_B, I_C$  – токи в фазах А, В, С;  $g_A, g_B, g_C$  – коэффициенты, полученные с помощью элементарной геометрии и закона Био-Савара-Лапласа для определения напряженности поля от тока в проводнике:

$$\begin{aligned} g_A &= (h \cos \gamma_1 + x_1 \sin \gamma_1) / (h^2 + x_1^2); \\ g_B &= (h \cos \gamma_2 + (x_2 - d) \sin \gamma_2) / (h^2 + (x_2 - d)^2); \\ g_C &= (h \cos \gamma_3 + (x_2 - 0,5d) \sin \gamma_3) / (h^2 + (x_2 - 0,5d)^2), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние между проводниками соседних фаз.

Для построения фильтра нужно, чтобы геркон 1 (2) реагировал на разность токов фаз А и С (В и С), то есть:  $B_{np}^{\Gamma 1} = \mu_0 g_A^{\Gamma 1} (I_A - I_C) / 2\pi;$  (3)

$$B_{np}^{\Gamma 2} = \mu_0 g_B^{\Gamma 2} (I_B - I_C) / 2\pi;$$

где  $B_{np}^{\Gamma 1}$  и  $B_{np}^{\Gamma 2}$  – магнитные индукции вдоль продольных осей герконов 1 и 2, необходимые для выделения токов обратной последовательности. Формулы (3) получаются из (1) при следующих условиях:

$$g_A^{\Gamma 1} = -g_C^{\Gamma 1}; g_B^{\Gamma 1} = 0; g_B^{\Gamma 2} = -g_C^{\Gamma 2}; g_A^{\Gamma 2} = 0. \quad (4)$$

Именно поток  $\Phi$ , создающий  $B_{np}$ , наводит электродвижущую силу (ЭДС) в обмотке геркона. Поэтому координаты герконов находим из (3).

Для геркона 1, например для электроустановки 110 кВ, используя элементарную геометрию и учитывая, что  $x_1 = -0,5$  м, и  $\gamma_1 = 30^\circ$ , для фазы А  $h_A^{\Gamma 1} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  м:

$$g_A^{\Gamma 1} = \frac{(h_A^{\Gamma 1} \cos \gamma_1 + x_1 \sin \gamma_1)}{((h_A^{\Gamma 1})^2 + x_1^2)} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - 0,5 \cdot \frac{1}{2}}{0,75 + 0,25} = 0,5 \text{ м},$$

для фазы В  $h_B^{\Gamma 1} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  м:

$$g_B^{\Gamma 1} = \frac{(h_B^{\Gamma 1} \cos \gamma_1 + (x_1 - d) \sin \gamma_1)}{((h_B^{\Gamma 1})^2 + (x_1 - d)^2)} = \frac{0,75 - 0,75}{1} = 0 \text{ м},$$

для фазы С  $h_C^{\Gamma 1} = 0$  м:

$$g_C^{\Gamma 1} = \frac{(h_C^{\Gamma 1} \cos \gamma_1 + (x_1 - 0,5d) \sin \gamma_1)}{((h_C^{\Gamma 1})^2 + (x_1 - 0,5d)^2)} = -0,5 \text{ м}.$$

Для геркона 2 с координатами  $x_2 = 1,5$  м,  $\gamma_2 = 30^\circ$ ,  $h_A^{\Gamma 2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  м,  $h_B^{\Gamma 2} = 0$  м,  $h_C^{\Gamma 2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  для фазы А:

$$g_A^{\Gamma 2} = \frac{(h_A^{\Gamma 2} \cos \gamma_2 + x_2 \sin \gamma_2)}{((h_A^{\Gamma 2})^2 + x_2^2)} = \frac{0,75 - 0,75}{0,75 + 0,25} = 0 \text{ м};$$

Значения коэффициентов для фаз В и С вычисляются аналогично:

$$g_B^{\Gamma 2} = 0,5 \text{ м}; g_C^{\Gamma 2} = -0,5 \text{ м}.$$

Разность токов  $I_A - I_C$  фаз А и С создает индукцию магнитного поля

$$B_{np}^{\Gamma 1} = \mu_0 g_A^{\Gamma 1} (I_A - I_C) / 2\pi = K_1 (I_A - I_C).$$

Магнитный поток  $\Phi^{\Gamma 1}$  есть поток вектора магнитной индукции  $B_{np}^{\Gamma 1}$  через поперечную площадь  $S$  обмотки геркона, то есть  $\Phi^{\Gamma 1} = \int_S \overline{B_{np}^{\Gamma 1}} d\overline{S} = K_2 B_{np}^{\Gamma 1}.$

Магнитный поток  $\Phi$  наводит в обмотке 3 ЭДС  $E^{\Gamma 1} = -d\Phi^{\Gamma 1} / dt = K_3 \Phi^{\Gamma 1}$ , сдвинутую на  $\pi/2$  относительно  $\Phi^{\Gamma 1}$ .  $E^{\Gamma 1}$  усиливается усилителем 7 и может плавно регулироваться коэффициентом  $K_y$  усиления усилителя 7. На выходе усилителя имеем  $E_y^{\Gamma 1} = K_y E^{\Gamma 1}$ . Отметим, что координаты герконов 1 и 2 должны быть выбраны так, чтобы  $B_{np}$  всех герконов совпадали (в режиме симметричной нагрузки) по величине, для совпадения коэффициентов преобразования токов  $K_1, K_2, K_3, K_y$ . Следовательно, на выводах торичной обмотки 11 разделительного трансформатора 9 имеем ЭДС, пропорциональную разности токов  $I_A - I_C$ :

$$E_7 = K_y \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 (I_A - I_C) = K_{ПАС} \cdot (I_A - I_C),$$

где  $K_{ПАС}$  – коэффициент пропорциональности;  $K_4$  – коэффициент, отражающий регулирование с помощью резистора 17;  $K_5$  – коэффициент трансформации разделительного трансформатора 9.

Аналогично на зажимы 18 и 19 с ФПС 20 подается ЭДС, которая сдвинута на угол  $2\pi/3$  относительно тока ее создавшего, то есть  $(I_B - I_C)$ .

$$E_{20} = K_y \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_6 \cdot K_7 (I_B - I_C) e^{-j120} = K_{ПВС} \cdot (I_B - I_C) e^{-j120},$$

где  $K_{ПВС}$  – коэффициент пропорциональности;  $K_6$  – коэффициент, отражающий регулирование с помощью резистора 21;  $K_7$  – коэффициент трансформации разделительного трансформатора 10.

Регулирования ЭДС на выводах вторичных обмоток 11 и 13 разделительных трансформаторов 9 и 10 с помощью резисторов необходимо, так как позволяет компенсировать погрешности, вызванные неточной установкой герконов и отклонениями параметров элементов устройства от паспортных, и обеспечивает равенство  $K_{ПАС} = K_{ПВС}$ . Таким образом, суммарная ЭДС, которая измеряется на выходных зажимах 18 и 19 равна:

$$E_{\Sigma} = E_7 + E_{20} = K_{ПАС} \cdot (I_A - I_C) + K_{ПВС} \cdot (I_B - I_C) e^{-j120} = K_{ПАС} \cdot [(I_A - I_C) + (I_B - I_C) e^{-j120}]. \quad (5)$$

Если в токах фаз присутствуют составляющие обратной последовательности  $I_{A2}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{C2}$ , то, подставляя их в (5), имея в виду,  $I_{A2} = I_2 e^{j0}$ ,  $I_{B2} = I_2 e^{j120}$ ,  $I_{C2} = I_2 e^{-j120}$ , получим  $E_{\Sigma} = 3K_{ПАС} I_2 \gg 0$ . При подстановке в (5) тока нулевой последовательности  $I_{A0}$ ,  $I_{B0}$ ,  $I_{C0}$   $E_{\Sigma} = 0$ , так эти токи совпадают по фазе. Также  $E_{\Sigma} = 0$  и при протекании в фазах А, В и С составляющих тока прямой последовательности  $I_{A1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{C1}$ .

В режиме нагрузки на зажимах 18 и 19 напряжение отсутствует, так как в фазах токи обратной последовательности не протекают. Не срабатывают и герконы 1 и 2, так как их индукции срабатывания  $V_{ср}$  отстроены от индукции  $V_1$ , созданной максимально возможным током нагрузки.

При трехфазных коротких замыканиях (КЗ)  $E_{\Sigma} = 0$ , а герконы 1 и 2 срабатывают, выдавая сигналы в логическую часть защиты (на фиг. 1 не показана). В результате выключатель электроустановки отключается. При двухфазном КЗ  $E_{\Sigma} \gg 0$ , так как появляются токи обратной последовательности, и срабатывают герконы 1 и 2, если индукция магнитного поля, созданного током двухфазного КЗ, достигает  $V_{ср}$ . В результате электроустановка отключается. Если контакты какого-либо из герконов залипли, то элемент ИЛИ 26 запускает реле времени 27, которое через выдержку времени, например 0,02 с, выдает сигнал в цепь сигнализации.

Для обеспечения требуемой чувствительности герконов 1 и 2 к токам трехфазного КЗ их

подмагничивают, подавая от источника 25 постоянного напряжения ток в обмотки 4 и 6 через блок 24 регулирования напряжения.

При возникновении неисправности в цепи, например, обмотки управления 3 равенство ЭДС, поступающих на входы нуля индикатора 22 с выводов обмоток 12 и 13 разделительных трансформаторов 9 и 10, нарушается. Поэтому он срабатывает и подает сигнал в цепь сигнализации и на блокировку логической части защиты (на фиг. 1 не показана). Чтобы нуль индикатора 22 не срабатывал ложно, он отстроен от ЭДС небаланса, возникающей при трехфазном коротком замыкании в электроустановке.

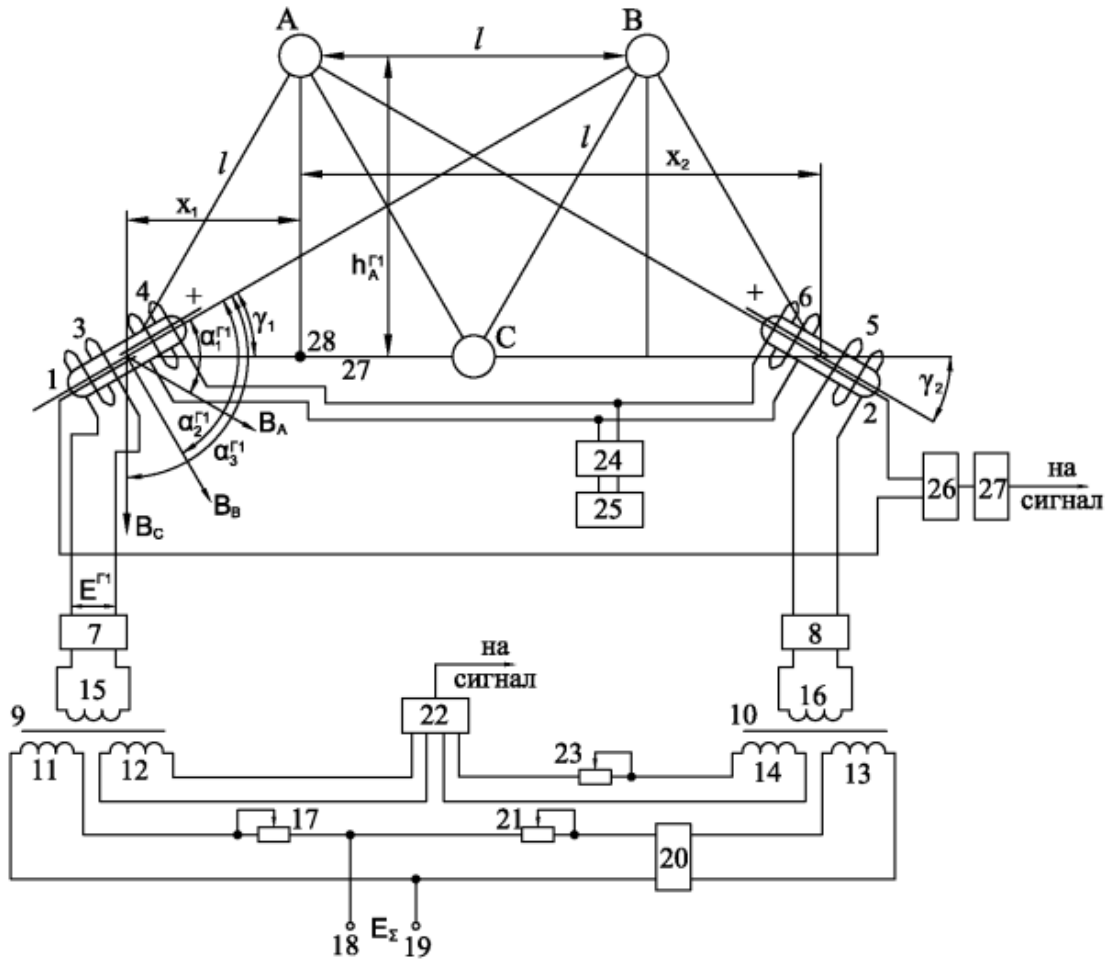
Экономический эффект - предлагаемый фильтр тока обратной последовательности позволяет выявлять токи двухфазного и трехфазного коротких замыканий без использования трансформаторов тока, а также уменьшить ущерб от несрабатывания или ложного срабатывания фильтра за счет своевременного выявления неисправностей в нем.

### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Фильтр тока обратной последовательности для электроустановок с токопроводами фаз, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, содержащий первую и вторую обмотки, первый и второй резисторы и выходные зажимы, первый и второй усилители, фазоповоротную схему, первый и второй герконы, установленные на безопасном расстоянии от токопроводов фаз электроустановки так, что продольная ось первого геркона совпадает с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы А с токопроводом фазы В и токопровод фазы В с токопроводом фазы С в плоскости поперечного сечения токопроводов, а продольная ось второго геркона – с биссектрисой угла между линиями, соединяющими токопровод фазы В с токопроводом фазы А и токопровод фазы А с токопроводом фазы С в этой плоскости, причем первая обмотка намотана на первый геркон, вторая – на второй геркон, входы первого усилителя подключены к первой обмотке, входы второго – ко второй, один вывод первого резистора подключен к первому выходному зажиму, к которому через второй резистор подключен один вывод фазоповоротной схемы, другой выход которой подключен к второму выходному зажиму, **отличающийся** тем, что введены третья обмотка, надетая на первый геркон, и четвертая обмотка, надетая на второй геркон, причем выводы третьей и четвертой обмоток подключены к выходам блока регулирования напряжения, входы которого подключены к источнику постоянного напряжения, первый и второй разделительные трансформаторы с двумя вторичными обмотками подключены первичными обмотками к выходам первого и второго усилителей, первая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора одним выводом подключена к свободному выводу первого резистора, а вторым – к второму выходному зажиму,

первая первичная обмотка второго разделительного трансформатора подключена к входам фазоворотной схемы, вторая вторичная обмотка первого разделительного трансформатора подключена к первым входам нуля индикатора, вторая вторичная обмотка второго разделительного трансформатора через третий резистор подключена к вторым входам нуля индикатора, выход которого

подключен в цепь сигнализации, контакты первого и второго герконов подключены к входам элемента ИЛИ и к логической части защиты от трехфазных коротких замыканий, реле времени входом подключено к выходу элемента ИЛИ, а выходом в цепь сигнализации.



Фиг. 1

Верстка Д. Женьсова  
Корректор Г. Косанова