

Особенности применения цифровых фильтров обратной последовательности в устройствах релейной защиты энергетических объектов

Н.А. ДОНИ, К.Н. ДОНИ
ООО НПП «ЭКРА»
Россия
doni_na@ekra.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровые фильтры, составляющие обратной последовательности, релейная защита.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты (УРЗ), так же как и в аналогичных устройствах предыдущих поколений, для выявления аварийных режимов в энергосистеме применяются фильтры обратной последовательности (ФОП) [1, 2]. Статические и динамические свойства ФОП оказывают существенное влияние на характеристики и поведение фильтровых измерительных органов (ИО) релейной защиты [3].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Частотные свойства ФОП

При использовании цифровых принципов выполнения УРЗ реализация ФОП может быть осуществлена различными способами. Один из методов реализации – классический, заключающийся в преобразовании числовой последовательности фазных величин сигналов в соответствующие вектора и использовании известного перехода от фазных к симметричным координатам путем фазовых поворотов полученных векторов и их суммирования [1, 2].

Переход от числовой последовательности цифровых отсчетов фазных величин к соответствующим векторам может производиться с помощью преобразователя Фурье. Синусоидальному сигналу с частотой ω_0 алгоритм Фурье ставит в соответствие постоянный во времени вектор. Оценка частотных свойств алгоритма при подаче на вход преобразователя единичного синусоидального сигнала $u(t) = \sin(q\omega_0 t + \varphi)$ приведена в [5]:

$$\dot{F}(t) = \frac{1}{2\pi j} \left\{ \frac{e^{j\alpha(t)}}{q-1} [e^{j2\pi q} - 1] + \frac{e^{-j\alpha(t)}}{q+1} [e^{-j2\pi q} - 1] \right\} e^{-j\omega_0 t}, \quad (1)$$

где $\alpha(t) = q\omega_0 t + \varphi - 2\pi q$.

Выражение в фигурных скобках характеризует два вектора, вращающихся в противоположном направлении с частотами $q\omega_0$ и $-q\omega_0$.

Для получения выходного сигнала одной из симметричных компонент необходимо удалить из входных сигналов две оставшиеся. Так, например, для выделения обратной последовательности следует удалить из подводимого трехфазного сигнала составляющие прямой и нулевой последовательности. Оставшийся сигнал представляет собой составляющую обратной последовательности.

Выходная величина фильтра обратной последовательности (ФОП) может быть получена из фазных величин $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ следующим образом [1]:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} [(\dot{U}_A - \dot{U}_B) + (\dot{U}_B - \dot{U}_C)e^{-j\pi/3}]. \quad (2)$$

Фазовый поворот одного из векторов в ФОП может осуществляться на угол $-\pi/2$. В этом случае выходная величина формируется из фазных величин в соответствии с выражением:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \left[\left(\dot{U}_A - \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} (\dot{U}_B - \dot{U}_C) e^{-j\pi/2} \right]. \quad (3)$$

Векторные диаграммы при подаче на вход ФОР трехфазного сигнала прямой и обратной последовательности с номинальной частотой ω_0 для обоих типов фильтров показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

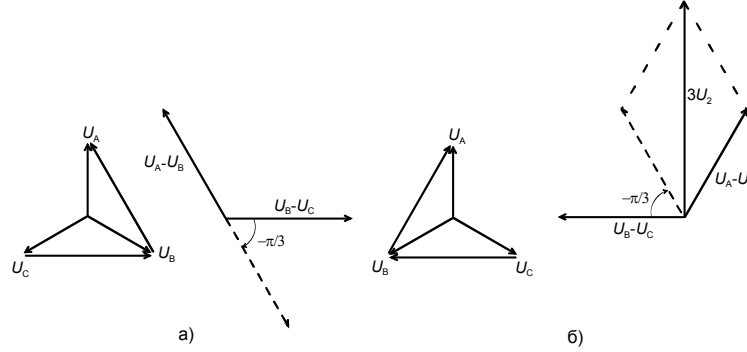


Рис. 1. Векторные диаграммы ФОР с фазовым поворотом вектора $-\pi/3$:
а) - при подаче прямой последовательности; б) - при подаче обратной последовательности

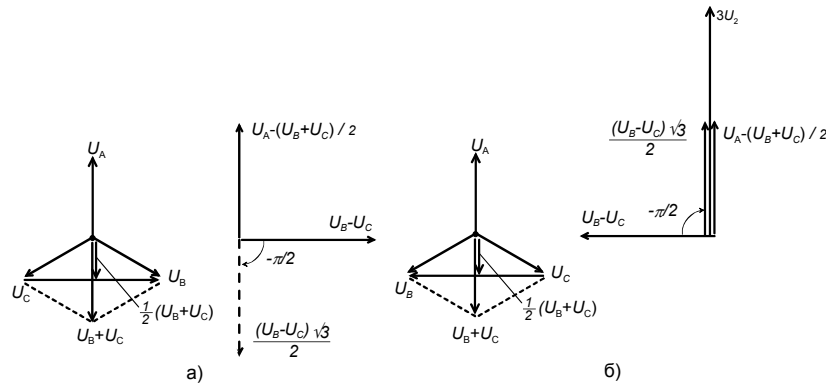


Рис. 2. Векторные диаграммы ФОР с фазовым поворотом вектора $-\pi/2$:
а) - при подаче прямой последовательности; б) - при подаче обратной последовательности

При включении ФОР на прямую и обратную последовательности трехфазного единичного сигнала с произвольной частотой $q\omega_0$ и начальной фазой φ_1 и φ_2 соответственно, выходные сигналы обоих типов ФОР одинаковы и равны:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1(t) &= \frac{1}{2\pi j} [d_2(q) (e^{-j[q(\omega_0 t - 2\pi) + \varphi_1]})] e^{-j\omega_0 t}, \\ \dot{U}_2(t) &= \frac{1}{2\pi j} [d_1(q) (e^{j[q(\omega_0 t - 2\pi) + \varphi_2]})] e^{-j\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $d_1 = \frac{e^{j2\pi q} - 1}{q - 1}$ ($q \neq 1$), для $q = 1$ $d_1 = 2\pi j$,

$$d_2 = \frac{e^{-j2\pi q} - 1}{q + 1}.$$

Из (4) следует, что при включении ФОР на сигнал прямой последовательности при любой частоте происходит полная компенсация векторов с положительным направлением вращения $q\omega_0$, а выходной частотный небаланс определяется только составляющими с отрицательным направлением вращения $-q\omega_0$. При включении на обратную последовательность выходной сигнал ФОР определяется суммой векторов с положительным направлением вращения $q\omega_0$, а составляющие с отрицательным направлением вращения $-q\omega_0$ полностью компенсируются при любой частоте сигнала.

При расчете уставок фильтровых УРЗ имеется ограничение на их минимальную величину, определяемую возможными расчетными небалансами на выходе ФОР. Одна из составляющих полного небаланса ФОР определяется отклонением частоты входных сигналов от номинальной.

Частотные небалансы ФОР принято оценивать коэффициентом $\gamma = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta f$, характеризующим величину небаланса $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе фильтра при приложении сигнала прямой последовательности с частотой, отличающейся от номинальной на величину Δf . По величине небаланса при отклонении частоты от номинальной, рассмотренные ФОР аналогичны широко используемым аналоговым фильтрам с коэффициентом $\gamma = 0,5$.

В случае использования цепях напряжения ФОР с коэффициентом $\gamma = 0,5$ отклонение частоты сигналов на 5% вызывает небаланс на выходе фильтра до 2,5 В при напряжении прямой последовательности 100 В. Поскольку необходимо обеспечить определенный коэффициент превышения рабочего сигнала над величиной небаланса, а также имеются дополнительные составляющие небалансов, минимальная уставка по напряжению срабатывания измерительных органов УРЗ, построенных на основе данных ФОР, должна быть более 5 В. Применение ФОР с уменьшенным коэффициентом γ позволяет снизить или исключить частотную составляющую из расчетной формулы величины небаланса и тем самым повысить чувствительность фильтровых УРЗ.

В связи с тем, что частотный небаланс на выходе ФОР определяется вектором, вращающимся по отношению к основным сигналам с двойной частотой, можно уменьшить его влияние применением дополнительных цифровых частотных рекурсивных фильтров для фильтрации действительной и мнимой части выходного вектора. Так, например, использование частотных фильтров первого порядка приводит к уменьшению коэффициента γ до 0,23, что ставит рассмотренное устройство в один ряд с относительно мало зависящими от частоты аналоговыми ФОР, для которых $\gamma = 0,29$ [7].

Однако наиболее радикальным способом устранения указанной составляющей небаланса является использование цифровых частотно-компенсированных ФОР. Для построения цифровых частотно-компенсированных ФОР может быть использовано преобразование числовой последовательности цифровых отсчетов фазных величин в новую числовую последовательность с применением рекурсивных цифровых фильтров второго порядка. При определенном выборе коэффициентов рекурсивных фильтров может быть получен ФОР, по своим свойствам близкий к известному частотно-компенсированному аналоговому ФОР [4].

Блок-схема такого ФОР приведена на рис. 3, где $X_1(nT)$ и $X_2(nT)$ – цифровые отсчеты, полученные из фазных величин сигналов в соответствии с векторной диаграммой на рис. 2.

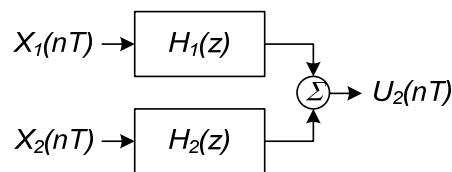


Рис. 3. Блок-схема частотно-компенсированного ФОР

Как следует из частотной характеристики предлагаемого ФОР, приведенной на рис. 4, для отклонения частоты сигналов в диапазоне ± 5 Гц, коэффициент $\gamma = (0 \dots 0,022)$.

Числовая последовательность выходного сигнала ФОР может быть подвергнута дополнительной цифровой фильтрации с помощью рекурсивных или нерекурсивных фильтров и быть использована для построения любых измерительных органов релейной защиты.

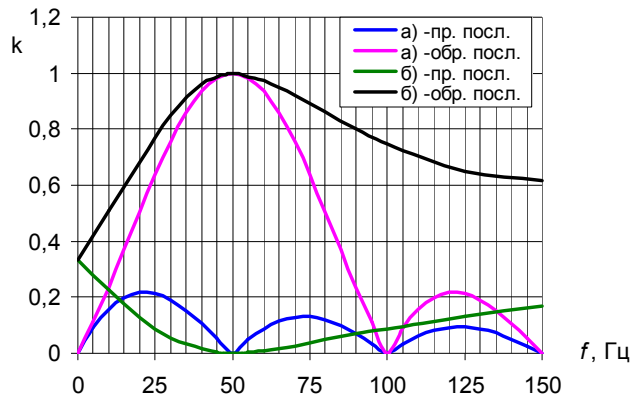


Рис. 4. Частотные характеристики ФОП:

а) — на основе векторных преобразований; б) — частотно-компенсированный; k — коэффициент передачи ФОП

Динамические свойства фильтровых ИО с одной подведенной величиной.

В фильтровых ИО с одной подведенной величиной, например реле напряжения обратной последовательности, модуль вектора данной симметричной составляющей сравнивается с заданным порогом с помощью компаратора К (рис. 5).

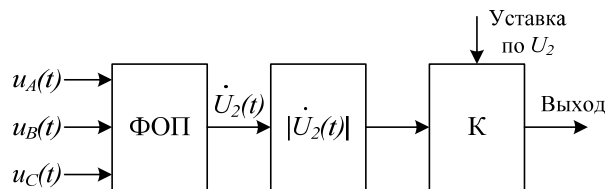


Рис. 5. Структурная схема цифрового ИО напряжения обратной последовательности

При подаче на вход ФОП единичного сигнала обратной последовательности ($A_2=1$), модуль его выходного сигнала нарастает по линейному закону (рис. 6 а) независимо от начальной фазы включения. Кратность входной величины по отношению к порогу срабатывания ИО равна 2.

Подача на вход ФОП сигнала прямой последовательности (рис. 6 б, $A_1=5$) сопровождается кратковременным появлением выходного сигнала, амплитудное значение которого достигает 0,15 от его величины при подаче обратной последовательности ($A_2=5$). Форма и величина выходного сигнала также не зависят от начальной фазы включения.

В случае реальных несимметричных повреждений в энергосистеме (ЭС) переходной процесс в ФОП определяется суммой аварийных составляющих сигналов прямой и обратной последовательности, возникающих в аварийном режиме.

Для случаев однофазных и междуфазных КЗ на включенной линии модули аварийных составляющих прямой A_1 и обратной последовательности A_2 равны и выходной сигнал ФОП нарастает монотонно (рис. 6, в). Множественность кривых нарастания выходного сигнала определяется различными начальными и взаимными фазовыми углами составляющих прямой и обратной последовательности в диапазоне $(0...180)^\circ$.

Для случая установки измерительных ТН на линии (что характерно для ВЛ напряжением 330 кВ и выше) и включении выключателя при опробовании поврежденной линии, соотношение между модулями аварийных составляющих напряжения прямой и обратной последовательности может достигать 5 и более. На выходе ФОП в этом режиме будет наблюдаться выброс, значительно превышающий сигнал обратной последовательности в установившемся режиме (рис. 6, г). Для режима «опробования» исправной линии, с целью исключения излишних кратковременных срабатываний ИО напряжения обратной последовательности, рекомендуется вводить задержку действия ИО на время не менее 0,02с.

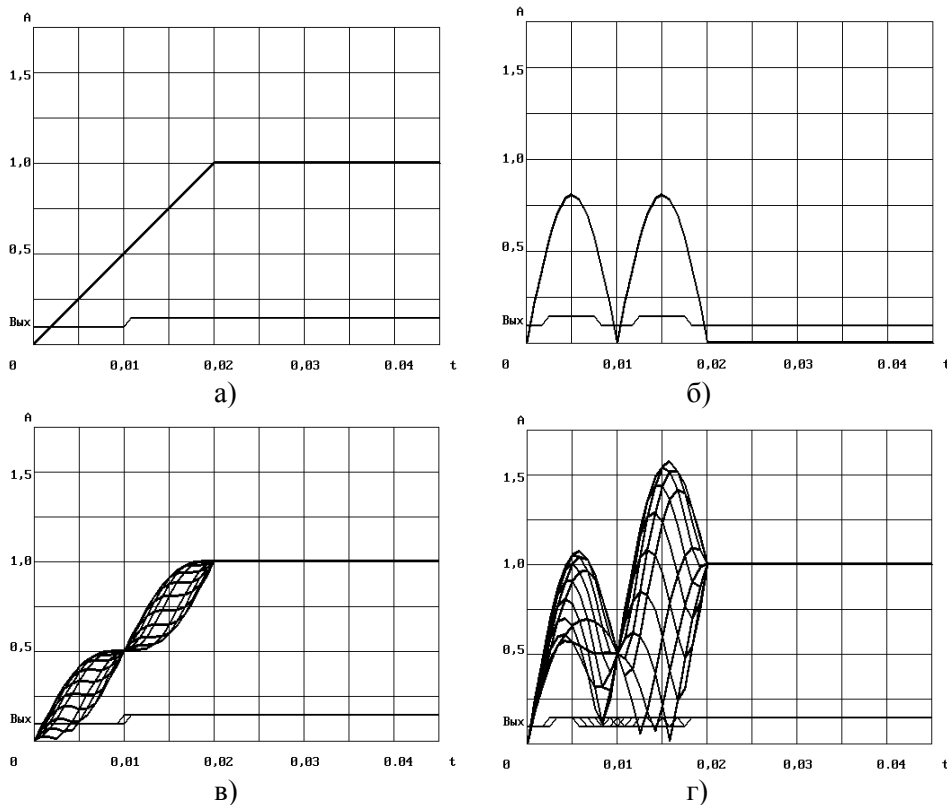


Рис. 6. Сигнал на входе компаратора К и сигнал срабатывания ИО обратной последовательности
а) - при подаче обратной последовательности, $A_2=1$; б) - при подаче прямой последовательности, $A_1=5$; в) $A_2=1$, $A_1=1$; г) $A_2=1$, $A_1=5$

Фильтровые ИО с двумя подведенными величинами

Рассмотрим наиболее часто используемую в УРЗ функцию ИО направления мощности обратной последовательности (НМОП). Такие ИО применяются в направленных фильтровых защитах ВЛ [6]. Структурная схема цифрового ИО НМОП показана на рис. 7.

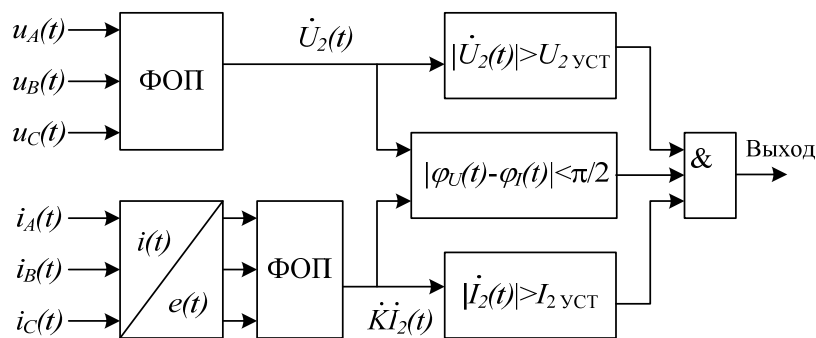


Рис. 7. Структурная схема цифрового ИО НМОП

Трехфазный ток преобразуется в сигнал $e(t)$, по цифровым отсчетам которого вычисляется вектор обратной последовательности $K \dot{I}_2(t)$, пропорциональный току обратной последовательности.

Действие ИО НМОП на отключение происходит при условии, что модуль разности фазовых углов векторов $\dot{U}_2(t)$ и $K \dot{I}_2(t)$ меньше $\pi/2$.

Отстройка от небалансов по напряжению и току обратной последовательности производится с помощью пороговых элементов с уставками $U_{2 \text{ уст}}$ и $I_{2 \text{ уст}}$ соответственно, выходы которых включены по схеме «И» с выходом схемы сравнения электрических величин по фазе. ИО НМОП определяет направление мощности обратной последовательности и действует на отключение, если источник несимметрии находится на ВЛ (рис. 8).

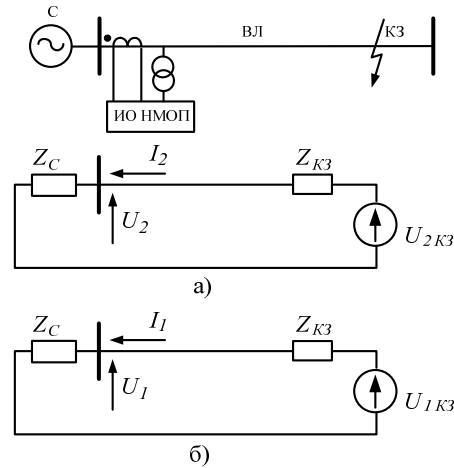


Рис. 8. Схема замещения ЭС для режима несимметричного КЗ на действующей ВЛ:
а) – для обратной последовательности; б) - для прямой последовательности

Характеристика срабатывания ИО НМОП представляет собой полуплоскость (в виде зоны $\pm\pi/2$ относительно угла максимальной чувствительности $\varphi_{мч}$), ограниченную дугой окружности радиусом $r = U_{2уст} / |\dot{I}_2|$ и центром в начале координат (рис. 9). Условием срабатывания ИО является охват характеристикой срабатывания точки Z_C , соответствующей сопротивлению замыкающей ЭС для составляющих обратной последовательности [6]. Характеристика не существует при $|\dot{I}_2| < I_{2уст}$.

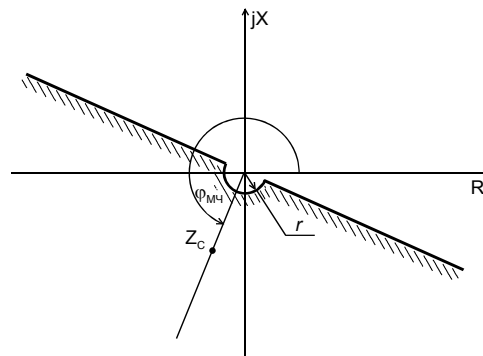


Рис. 9. Характеристика срабатывания ИО НМОП в комплексной плоскости сопротивлений обратной последовательности при фиксированной величине тока обратной последовательности

Несмотря на то, что установившиеся значения выходных сигналов обоих ФНОП для прямой последовательности равны нулю, аварийные составляющие сигналов прямой последовательности вызывают определенную выходную реакцию фильтров и искажают вычисляемое значение вектора $Z_C(t)$. Поэтому статические характеристики ИО НМОП определяются только сигналами обратной последовательности, а динамические характеристики определяются аварийными составляющими сигналов обратной и прямой последовательности, возникающими при повреждениях и коммутациях в ЭС.

Взаимный фазовый сдвиг аварийных составляющих тока и напряжения прямой последовательности в месте установки ИО НМОП (ТН на линии) зависит от того, имеет ли место КЗ на действующей ВЛ или это включение поврежденной линии.

Для **несимметричных КЗ** на действующей линии источники аварийной составляющей обратной и прямой последовательности находятся в месте повреждения и мощность аварийной составляющей прямой последовательности направлена из линии в шины. При допущении одинаковых параметров энергосистемы $Z_C = R_C + j\omega L_C$ для прямой и обратной

последовательности, взаимосвязь между током и напряжением обратной последовательности и для аварийных составляющих прямой последовательности в месте установки ИО НМОП:

$$u_2(t) = L_C \frac{di_2}{dt} + R_C \cdot i_2(t), \quad u_{1ae}(t) = L_C \frac{di_{1ae}}{dt} + R_C \cdot i_{1ae}(t). \quad (8)$$

Если преобразование входных фазных токов в напряжение (рис. 7) производится в соответствии с выражением:

$$e_n(t) = k_L \cdot \frac{di_n}{dt} + k_R \cdot i_n(t), \quad (n=A,B,C), \quad (9)$$

то, при выполнении условия $R_C/L_C = k_R/k_L$, разность фаз сравниваемых векторов $\dot{U}_2(t)$ и $\dot{K}i_2(t)$ близка к нулю как в переходном, так и в установившемся режимах. Быстродействие такого ИО НМОП определяется только временем действия пороговых элементов по току и напряжению обратной последовательности.

При трехфазных замыканиях на действующей ВЛ присутствуют только аварийные составляющие прямой последовательности, источник которых находится в месте повреждения. В этом случае, ИО НМОП во время переходного процесса в ФОРП правильно определяет направление повреждения. При условии превышения выходным сигналом ФОРП уровня срабатывания пороговых элементов по току и напряжению может обеспечиваться импульсное действие ИО, даже при отсутствии предварительной несимметрии.

В режиме включения линии с несимметричным повреждением (рис. 10) источником прямой последовательности является э. д. с. энергосистемы E_C , а мощность прямой последовательности при данной коммутации протекает из шин в линию (к месту повреждения).

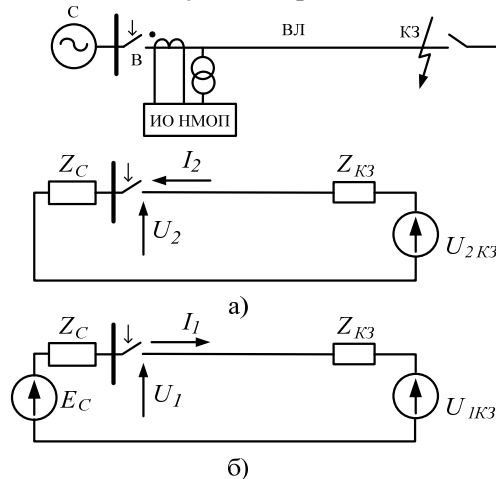


Рис. 10. Схема замещения ЭС для режима включения выключателя на несимметричное повреждение: а) – для обратной последовательности; б) – для прямой последовательности

В этом режиме переходные процессы в ФОРП, определяемые источником прямой последовательности, находящимся вне линии, искажают вектора сигналов обратной последовательности в цепях тока и напряжения, ориентируя схему сравнения фаз векторов на внешнее повреждение. При этом возможна задержка появления сигнала на выходе схемы сравнения векторов до окончания переходных процессов в ФОРП (0,02 с).

В режиме включения на трехфазное КЗ, при отсутствии разновременности включения фаз выключателя, источник напряжения обратной последовательности отсутствует, а источник напряжения прямой последовательности находится со стороны шин. В связи с этим выход схемы сравнения векторов по фазе ИО НМОП во время переходных процессов в ФОРП на отключение не действует.

Для исключения отказа фильтровых защит в режиме опробования линии следует предусматривать кратковременный ввод в действие токовых или дистанционных реле, обеспечивающих распознавание трехфазного КЗ.

В режиме одностороннего включения неповрежденной линии имеет место переходной процесс только в цепях напряжения и кратковременное появление сигнала на выходе порогового элемента по напряжению не приводит к действию ИО НМОП на отключение.

Рассмотренные выше режимы полностью подтверждается как результатами исследований на цифро-аналоговой модели энергосистемы (RTDS), так и по многочисленным зарегистрированным процессам при реальных повреждениях и коммутациях в энергосистемах.

3. ВЫВОДЫ.

1. Для повышения чувствительности фильтровых защит рекомендовано применять цифровые частотно-компенсированные ФОР.

2. При включении поврежденной линии возможно замедление в действии ИО НМОП на время до 0,02 с, а при включении исправной ВЛ на холостой ход возможно излишнее срабатывание реле напряжения обратной последовательности.

4. ЛИТЕРАТУРА:

1. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих – Л.-М.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 408 с.

2. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.

3. Дони Н.А. Некоторые вопросы применения активных фильтров напряжения обратной последовательности в направленной высокочастотной защите // Устройства релейной защиты и автоматики энергосистем: Труды ВНИИР. Чебоксары. 1981. Вып 12. С 17–31.

4. А.С. № 864978. Фильтр напряжения обратной последовательности – БИ № 37, 1984 г. / Дони Н.А.

5. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты. –М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

6. Дони Н.А., Шнеерсон Э.М. Области действия сложных фильтровых измерительных органов релейной защиты. – Электрические станции, 1977, № 8.

7. Дони К.Н., Дони Н.А. Частотные свойства цифровых фильтров симметричных составляющих. – Электричество, 2003, № 5.

8. Гельфанд Я.С., Дони Н.А., Левиуш А.И. и др. Панель высокочастотной направленной защиты ПДЭ 2802. –М.: Энергоатомиздат, 1992. – 128 с.