

# **О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРАЩЕНИЯ ТОКА НА ВЫХОДЕ ФИЛЬТРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

*Р.А. Вайнштейн, А.В. Доронин, Е.А. Понамарёв, В.В. Шестакова,  
(Томский политехнический университет, Томск; НПП «ЭКРА», Чебоксары)*

Как известно, одним из факторов, который затрудняет выполнение защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–35 кВ, является необходимость отстройки от тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности. В ряде случаев, когда для подключения защиты от замыканий на землю используются трёхтрансформаторные фильтры тока нулевой последовательности, выполнение защиты, удовлетворяющей требованиям по чувствительности, вообще является невозможным.

Типичными примерами таких случаев являются воздушные линии напряжением 35 кВ и синхронные генераторы, присоединённые к сборным шинам генераторного напряжения жёстким шинным мостом. Так как для последнего случая специальные шинные трансформаторы тока давно не выпускаются, то единственным средством для измерения тока нулевой последовательности является использование группы из трёх типовых трансформаторов тока.

Одним из известных приёмов выполнения защиты от замыканий на землю в условиях больших токов небаланса является использование естественных или искусственно создаваемых токов с частотой, отличающейся от промышленной, с последующей отстройкой от тока небаланса с помощью частотных фильтров. Однако использование токов с частотой, отличающейся от промышленной, в ряде случаев затруднительно либо из-за недостаточного уровня естественных гармонических составляющих, либо из-за отсутствия технической возможности включения специальных источников тока.

В данной статье предлагается выполнение защиты на токах нулевой последовательности промышленной частоты с отстройкой от тока небаланса путём формирования приращения вектора тока на выходе фильтра нулевой последовательности при возникновении замыкания на землю. Использование приращения электрических величин при каких-либо нарушениях и повреждениях в технике релейной защиты и автоматике вообще известно [1]. Принципиально использование не полных электрических величин, а их приращений для выявления повреждённых элементов возможно в том случае, если при возникновении повреждения появляется некоторый общий признак независимо от места повреждения. Этот общий признак необходим для подачи команды на запоминание доаварийного значения измеряемой величины.

Очевидно, что в сетях 6–35 кВ общим признаком замыкания на землю является напряжение нулевой последовательности, по факту появления которого вырабатывается логический сигнал для дальнейшего использования. Поскольку неизбежна некоторая задержка в выработке логического сигнала, то в запоминающем устройстве должна быть предусмотрена соответствующая задержка изменения информации о токе небаланса до замыкания.

Ток небаланса является случайной величиной и при прочих равных условиях зависит от тока нагрузки защищаемого элемента. Так как при замыкании ток на выходе фильтров нулевой последовательности является суммой тока небаланса и вторичного тока нулевой последовательности, то использование принципа выделения приращения возможно в том случае, если за время работы защиты ток нагрузки защищаемого элемента не изменится. Время работы защиты, например при её действии на отключение, может находиться в

пределах от нескольких десятых долей секунды до нескольких секунд. Вероятность того, что после возникновения замыкания изменится ток нагрузки, весьма мала.

Техническая реализация операции выделения приращения тока может быть осуществлена как на базе аналоговых элементов, так и в цифровой форме программным путём. Независимо от конкретной технической реализации функциональная схема, отображающая возможный вариант обработки сигналов, представлена на рис. 1.

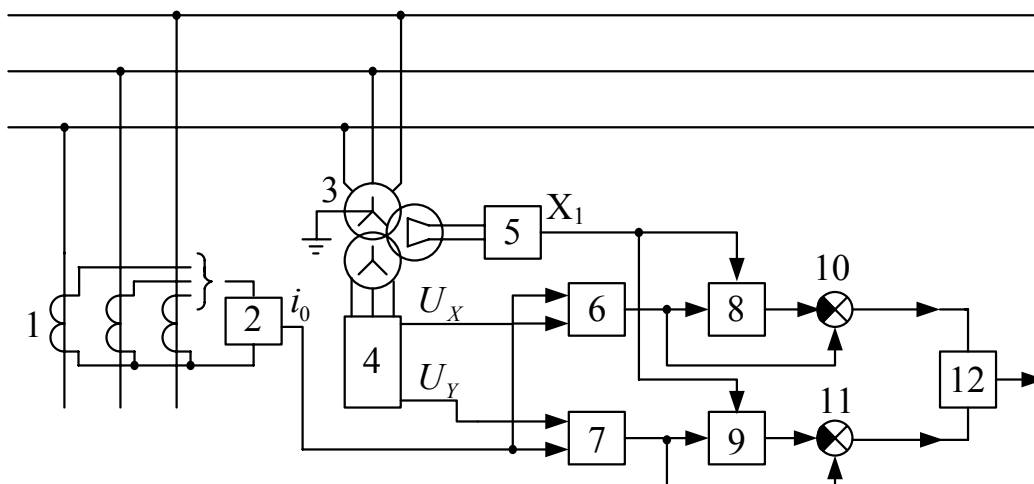


Рис. 1. Функциональная схема устройства для формирования приращения тока фильтра нулевой последовательности

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: 1 – фильтр токов нулевой последовательности, 2 – преобразователь тока нулевой последовательности в пропорциональный электрический сигнал ( $i_0$ ), 3 – трансформатор напряжения, 4 – формирователь опорных сигналов (осей)  $U_X$  и  $U_Y$ , сдвинутых относительно друг друга на  $90^\circ$ , 5 – релейный элемент, вырабатывающий логический сигнал  $X_1$  при превышении напряжением нулевой последовательности заданной уставки, 6 и 7 – блоки формирования проекций вектора тока на оси  $U_X$  и  $U_Y$ , 8 и 9 – запоминающие устройства, управляемые логическим сигналом  $X_1$ , 10 и 11 – сумматоры, 12 – формирователь модуля приращения тока выхода фильтра нулевой последовательности.

Преобразователь тока нулевой последовательности 2 может содержать фильтр низкой частоты для обеспечения работы защиты при перемежающихся дуговых замыканиях [2].

Принцип определения модуля приращения тока на выходе фильтра токов нулевой последовательности поясняется с помощью векторной диаграммы (рис. 2).

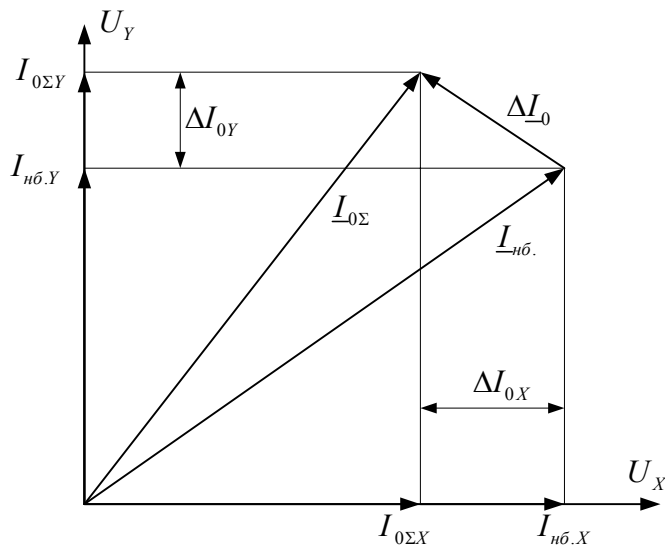


Рис. 2. Векторная диаграмма формирования приращения тока фильтра нулевой последовательности

В режиме ожидания до замыкания непрерывно вычисляются проекции  $I_{нб.X}$  и  $I_{нб.Y}$  вектора тока небаланса  $\underline{I}_{нб}$  на оси  $U_X$  и  $U_Y$ . Сигналы, пропорциональные ортогональным составляющим тока подаются в запоминающие устройства. При замыкании на землю вырабатывается логический сигнал  $X_1$ , при подаче которого значения ортогональных составляющих  $I_{нб.X}$  и  $I_{нб.Y}$  сохраняются в запоминающих устройствах и подаются на сумматоры. Сигналы, пропорциональные ортогональным составляющим вектора суммарного тока на выходе фильтра токов нулевой последовательности  $\underline{I}_{0\Sigma}$ , также подаются на сумматоры, на выходе которых формируются ортогональные составляющие вектора приращения тока  $\Delta I_{0X}$  и  $\Delta I_{0Y}$ . Ортогональные составляющие вектора приращения тока содержат в себе информацию, как об абсолютной величине, так и о фазе тока нулевой последовательности защищаемого элемента и поэтому могут использоваться для построения как токовой, так и направленной защиты.

Опорные сигналы (рис.1, блок 4) формируются из линейных напряжений, которые при замыкании на землю практически не изменяются. Если за сигнал  $u_X$  принять линейное напряжение фаз В и С,  $\underline{U}_X = \underline{U}_{BC}$ , то векторы линейных напряжений других фаз будут равны  $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_X e^{j120^\circ}$ ,  $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_X e^{j240^\circ}$  и тогда вектор сигнала  $u_Y$  может быть получен следующим образом:

$$\underline{U}_Y = \frac{\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}}{\sqrt{3}} = \underline{U}_X e^{j90^\circ}.$$

Блоки формирования сигналов, пропорциональных проекциям тока на оси  $U_X$  и  $U_Y$ , могут быть выполнены в виде перемножителей мгновенных значений сигналов  $u_X i_0$  и  $u_Y i_0$ .

Так как опорные напряжения  $u_X$  и  $u_Y$  практически синусоидальны, то операция перемножения с последующим выделением среднего значения одновременно обеспечивает отстройку от высших гармоник. Это объясняется тем, что ненулевые средние значения дают только произведения сигналов одинаковых частот.

Далее приняв мгновенные значения опорных сигналов и первой гармоники тока выхода фильтра нулевой последовательности как  $u_X = U_m \sin(\omega t)$ ,  $u_Y = U_m \cos(\omega t)$ ,  $i_0 = I_{0m} \sin(\omega t + \gamma)$ ,

получим средние значения сигналов на выходе формирователя ортогональных составляющих в виде:

$$I_{0X} = \frac{1}{2} U_m I_{0m} \cos(\gamma),$$

$$I_{0Y} = \frac{1}{2} U_m I_{0m} \sin(\gamma).$$

Функция, запоминания ортогональных составляющих сигналов, при программной реализации может быть обеспечена соответствующим алгоритмом программы, а при аналоговой реализации в качестве запоминающих устройств может быть применена, например, известная схема выборки-хранения [3]. При выполнении защиты, реагирующей на абсолютное значение тока нулевой последовательности, в блоке 12 из приращений ортогональных составляющих формируется величина:

$$\Delta I_0 = \sqrt{(\Delta I_{0X})^2 + (\Delta I_{0Y})^2}.$$

На данном этапе разработки проверка работоспособности предлагаемого способа измерения тока нулевой последовательности выполнена с помощью моделирования в программе MATLAB.

В качестве объекта моделирования принята электрическая сеть 35 кВ с высокоомным резистивным заземлением нейтрали и с суммарным ёмкостным током замыкания, равным 4 А. Сопротивление заземляющего резистора принимается, как известно, таким, чтобы активная составляющая тока в месте замыкания была примерно равна ёмкостной составляющей. Собственный ёмкостный ток защищаемой линии  $I_{cl}$  равен 1,5 А. Вторичный ток небаланса фильтра токов нулевой последовательности, образованного тремя трансформаторами тока с коэффициентом трансформации 600/5, составляет 30 мА, чему соответствует первичный ток небаланса – 3,6 А.

При резистивном заземлении нейтрали и наличии фильтра низкой частоты в измерительном органе защиты для отстройки от собственного ёмкостного тока могут учитываться только аппаратные погрешности [2]. Поэтому ток срабатывания защиты в худшем случае, когда собственный ёмкостный ток линии при внешнем замыкании и ток небаланса совпадают по фазе, должен быть равен:

$$I_{cp} = k_H (I_{cl} + I_{нб}) = 1,2 \cdot (1,5 + 3,6) = 6,12 \text{ А},$$

где  $k_H = 1,2$  - коэффициент надежности.

При замыкании на защищаемой линии, в зависимости от модуля фазы тока небаланса, ток в защите может изменяться в широких пределах и, например, в режиме малого рабочего тока, когда ток небаланса близок к нулю, равен 4,7 А. Как видно при принятых условиях защита не чувствительна.

При устранении влияния тока небаланса ток срабатывания защиты может быть установлен равным 1,8 А, а при внутреннем замыкании ток в месте установки защиты определяется только параметрами сети и сопротивлением заземляющего резистора и составляет 4,7 А.

В качестве примера на рис.3 приведены расчётные эпюры сигналов в модели защиты при внешнем устойчивом замыкании. Ординаты кривых на рис.3 отнесены к значению сигнала, соответствующего амплитуде суммарного ёмкостного тока замыкания.

Из результатов моделирования следует, что предлагаемый способ выполнения защиты действительно позволяет устранить влияние тока небаланса.

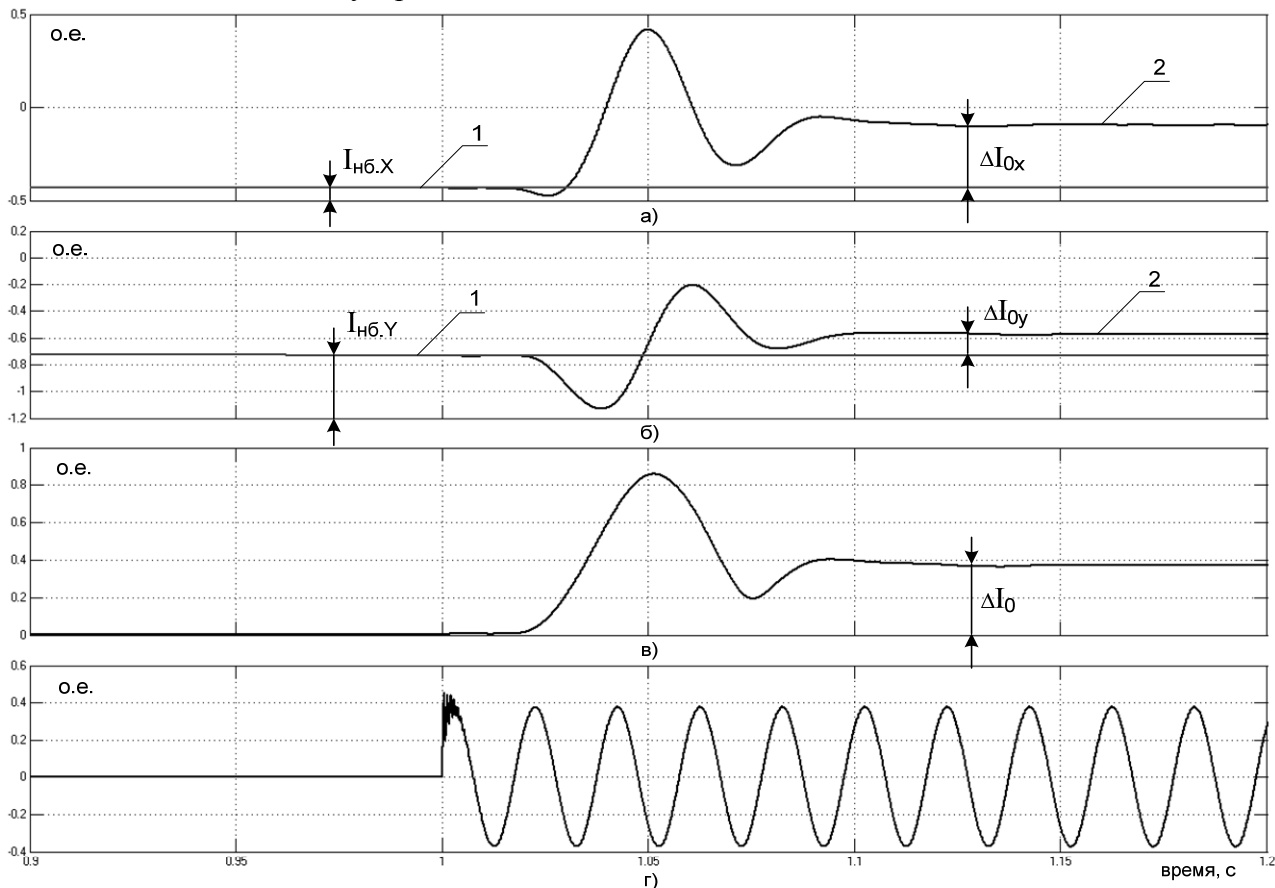


Рис. 3. Эпюры сигналов при внешнем устойчивом замыкании:  
 а) и б) сигналы на выходе формирователя ортогональных составляющих, 1 – до замыкания, 2 – после замыкания; в) абсолютное значение приращения тока выхода фильтра нулевой последовательности; г) ток в месте замыкания.

Изменение составляющих  $\Delta I_{0x}$  и  $\Delta I_{0y}$  после замыкания в виде затухающих колебаний обусловлено переходными процессами в фильтрах низкой частоты. Отстройка от этих переходных процессов может быть обеспечена введением выдержки времени.

Эпюры сигналов при внутреннем замыкании не приводятся, поскольку они отличаются в основном только уровнями и никакой дополнительной существенной информации не несут.

Правильная работа защиты при дуговых перемежающихся замыканиях обеспечивается благодаря наличию фильтра низкой частоты в преобразователе тока нулевой последовательности (блок 2 на рис.1). Кроме этого в данной схеме сильными фильтрующими свойствами обладают формирователи ортогональных составляющих, содержащие перемножители и фильтры низкой частоты.

На рис.4 приведены эпюры сигналов при одной из реализаций дугового перемежающегося замыкания, когда пробивное напряжение постоянно и дуга гаснет при первом прохождении через ноль тока дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз.

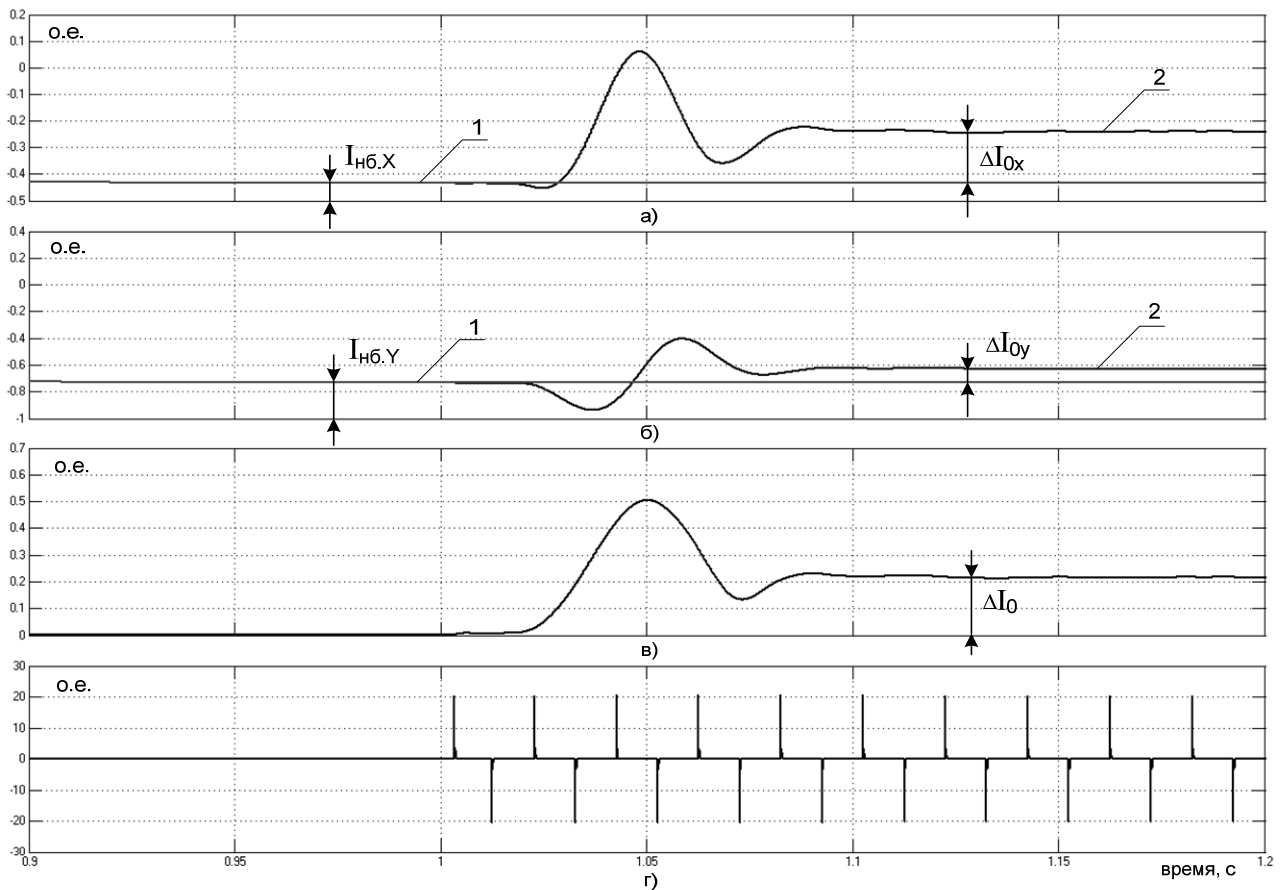


Рис. 4. То же что и на рис.3 при внешнем дуговом перемежающемся замыкании.

Полученные результаты могут быть основой для технической проработки защиты от замыканий на землю, основанной на формировании приращеня тока выхода фильтра нулевой последовательности.

### Литература

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976, 560 с.
2. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М., Гурин Т.С. Защита от замыканий на землю в кабельных сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали / Труды Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ»: Новосибирск, 2006. – С. 121-126.
3. А.с. № 1492409. Устройство для защиты от замыкания на землю / Р.А. Вайнштейн, А.Ф. Карбышев. Приор. 14.01.87; Оpubл. 07.07.89, Бюл. № 25.