

Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю

- Антонов В. И.¹, канд. техн. наук, ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары
- Наумов В. А., канд. техн. наук, ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары
- Солдатов А. В., ООО НПП “ЭКРА”, Чебоксары
- Иванов Н. Г., ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары
- Митин Д. А., ООО НПП “ЭКРА”, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

При однофазных замыканиях на землю в сети генератора высшие гармонические составляющие являются хорошей информационной базой для релейной защиты генератора от однофазных замыканий на землю. Из-за низкого отношения сигнал/шум они недоступны для непосредственного измерения. Предложен новый метод активно-адаптивного распознавания подобных сигналов. Результаты испытания опытного образца устройства защиты генератора с активно-адаптивным трактом аналого-цифрового преобразователя (АЦП) подтверждают высокую эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: Активно-адаптивный метод распознавания сигнала, аналого-цифровое преобразование, генератор, релейная защита.

Известно, что высшие гармоники в генераторной сети представляют собой широкий информационный базис для релейной защиты генератора от замыканий обмотки статора на землю [1, 2]. Однако на практике извлечение информации, содержащейся в высших гармониках, является достаточно сложной задачей. Это связано с тем, что уровень высших гармоник приходится оценивать на фоне доминирующей основной гармоники. Традиционные цифровые устройства релейной защиты имеют относительно небольшой динамический диапазон измерения входных токов, причём смещённый в сторону больших кратностей [3]. В связи с этим их тракты АЦП в принципе не различают высшие гармоники.

Классический подход к повышению разрешающей способности тракта АЦП подразумевает использование аналоговых режекторных фильтров с высокой добротностью, настроенных на усиление информационной слагаемой и подавление других компонентов сигнала [4]. Однако выраженная зависимость коэффициента передачи аналогового фильтра от частоты в окрестности частоты режкции приводит к значительному ослаблению избирательности фильтра при девиации частоты информационной слагаемой, снижая чувствительность защиты. Поэтому использование режекторных фильтров для распознавания информационной слагаемой оказывается недостаточно эффективным [5].

В связи с этим существует необходимость повышения разрешающей способности тракта АЦП устройств защит генератора при распознавании информационной слагаемой на фоне преобладающих составляющих входного сигнала. Настоящая статья посвящена решению этой задачи на основе нового метода активно-адаптивного распознавания сигналов.

Активно-адаптивное распознавание сигнала. Основопологающая идея активно-адаптивного распознавания заключается в адаптивном преобразовании входного сигнала со слабой информационной слагаемой в промежуточный непрерывный сигнал, уровень информационной слагаемой в котором достаточно высок и находится в области разрешения АЦП. Структурная схема тракта измерения АЦП представлена на рис. 1.

Поясним принцип работы схемы тракта.

Электрический сигнал

$$x(t) = x_0(t) + x_n(t), \quad (1)$$

представляющий собой сумму слабой информационной слагаемой $x_0(t)$ и доминирующего побочного сигнала $x_n(t)$, преобразуется в цифровой сигнал $x(k)$ с помощью первого АЦП (ADC_1). На основе цифрового сигнала в первом блоке адаптивного структурного анализа ASA_1 формируется цифровой образ $x_n(k)$ (компонентный состав) доминирующего побочного сигнала $x_n(t)$, свободного от информационной слагаемой. Затем упомянутый цифровой сигнал $x_n(k)$ преобразуется обратно в

¹ Антонов Владислав Иванович: antonov_vi@ekra.ru

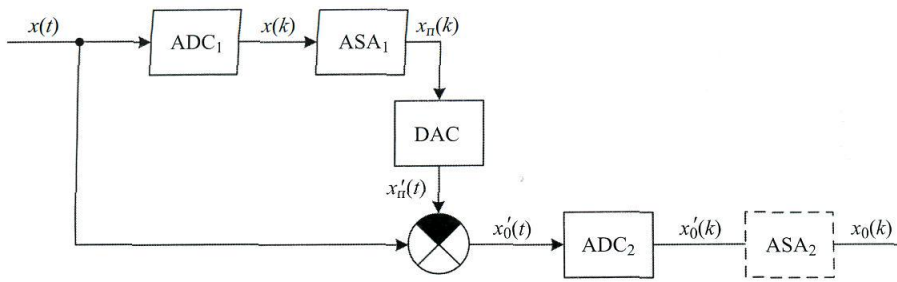


Рис. 1. Структурная схема тракта измерения АЦП активно-адаптивного распознавания слабой информационной слагаемой сигнала:

ADC_1 и ADC_2 – первый и второй АЦП; ASA_1 и ASA_2 – первый и второй блоки адаптивного структурного анализа; DAC – цифро-аналоговый преобразователь

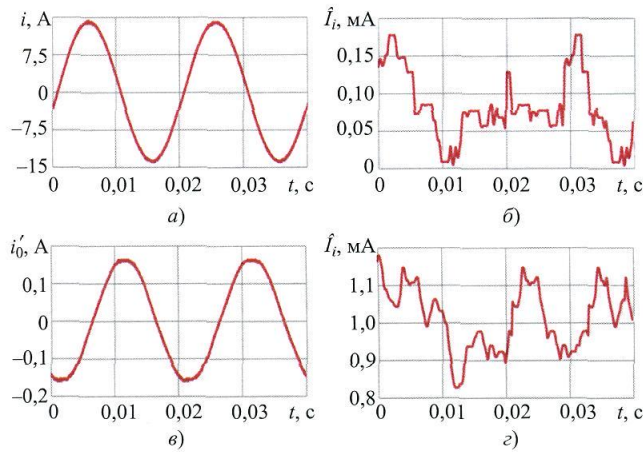


Рис. 2. Активно-адаптивное распознавание третьей гармоники тока информационной слагаемой сигнала по выражению (2) при $I_0 = 0,001$ А, $I_n = 10$ А (отношение сигнал/шум равно 10^{-4}):

a – входной сигнал; *б* – оценка действующего значения информационной слагаемой непосредственно по отсчётам сигнала $i(k)$; *в* – сигнал $i'_0(k)$ после активно-адаптивного подавления побочного сигнала (отношение сигнал/шум повышено до $110 \cdot 10^{-4}$); *г* – оценка действующего значения информационной слагаемой в сигнале $i'_0(k)$; разрядность всех АЦП и ЦАП

непрерывный сигнал $x'_n(t)$ путём цифроаналогового преобразования DAC и вычитается из входного сигнала $x(t)$. Полученный таким образом промежуточный непрерывный сигнал $x'_0(t)$ будет содержать в себе информационную слагаемую без изменения и заметно подавленный побочный сигнал (в идеальном случае промежуточный сигнал будет включать только информационную слагаемую). Соотношение сигнал/шум для промежуточного сигнала будет значительно повышено. Поэтому в цифровом сигнале $x'_0(k)$, полученном после аналого-цифрового преобразования промежуточного сигнала $x'_0(t)$ вторым АЦП ADC_2 , информационная слагаемая представлена с достаточной точностью.

Конечно, в общем случае цифровой сигнал $x'_0(k)$ может содержать следы побочного сигнала $x_n(k)$, но они могут быть легко исключены при по-

следующей обработке. Обычно её производят программным способом (блок ASA_2 на рис. 1).

Эффективность системы легко доказывается. Продemonстрируем её на примере оценки действующего значения третьей гармоники (информационной слагаемой) на фоне преобладающей основной гармоники сигнала:

$$x(t) = X_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) + X_n \cos(\omega_n t + \psi_n), \quad (2)$$

где X_n , X_0 и $\omega_n = 100\pi$, $\omega_0 = 3\omega_n = 300\pi$ – амплитудные значения и частоты побочного сигнала (доминирующей составляющей) и информационной слагаемой соответственно.

Сигнал по выражению (2) путём аналого-цифрового преобразования превращается в цифровой сигнал

$$x(k) = ADC_1 x(t), \quad (3)$$

где k – дискретное время, связанное с непрерывным временем t как $t = kT_s$; T_s – период дискретизации сигнала; $ADC_1 x(t)$ – функция АЦП. Разрядность АЦП ADC_1 в этом случае выбирается исходя из максимального значения X_{max} сигнала по выражению (2), достигаемого при верхней границе диапазона значений $X_{0,max}$ и $X_{n,max}$ информационной $x_0(t)$ и побочной $x_n(t)$ составляющих соответственно:

$$X_{max} = X_{0,max} + X_{n,max}. \quad (4)$$

Очевидно, что если отношение $X_{0,min}/X_{n,max}$, характеризующее относительный уровень информационной слагаемой в сигнале, будет мало, то оценка \hat{X}_0 комплексной амплитуды X_0 будет иметь значительную погрешность или неизмерима АЦП. Последнее хорошо видно из рис. 2, б: при отношении сигнал/шум, равном 10^{-4} , вычисленном как отношение амплитуды третьей гармоники к амплитуде основной гармоники, оценка \hat{X}_0 не отражает истинного содержания информационной составляющей в сигнале.

Для повышения разрешающей способности аналого-цифрового преобразования из электриче-

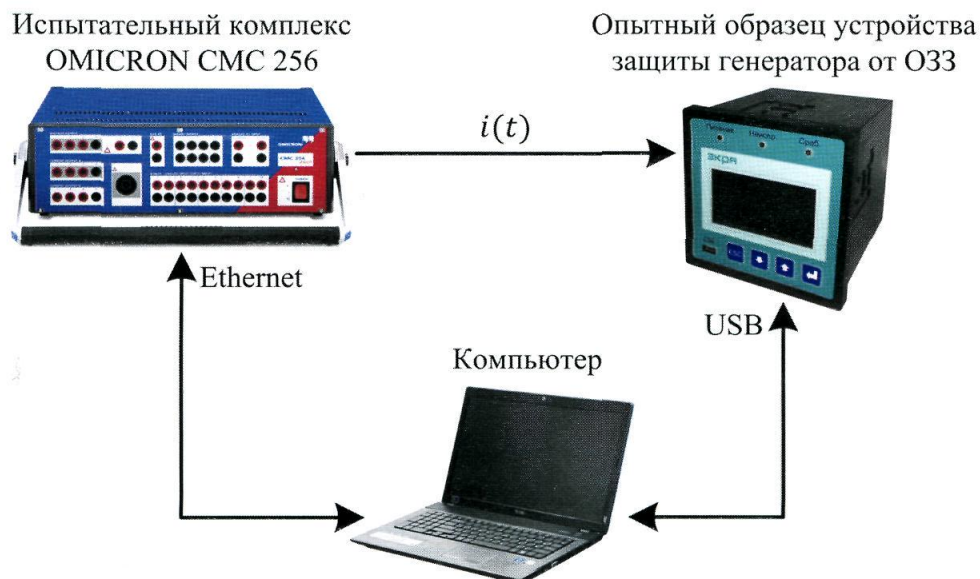


Рис. 3. Схема испытаний опытного образца устройства защиты генератора от ОЗЗ с трактом АЦП активно-адаптивного распознавания слабой информационной слагаемой сигнала

ской величины удаляется побочный сигнал $x_n(t)$. Для этого цифровой сигнал $x(k)$ по выражению (2) подвергается адаптивному структурному анализу в блоке ASA_1 , и по его результатам формируют цифровую модель побочного сигнала $x_n(k)$. В нашем случае это будет модель основной гармоники

$$x_n(k) = \sqrt{2} \hat{X}_n \cos(\hat{\omega}_n k T_s + \hat{\psi}_n), \quad (5)$$

все параметры которой (оценки действующего значения \hat{X}_n , частоты $\hat{\omega}_n$ и начальной фазы $\hat{\psi}_n$) определяются в блоке ASA_1 по отсчётам $x(k)$.

На процесс определения модели доминирующего сигнала $x_n(k)$ уровень информационной составляющей не оказывает влияния, информационная слагаемая в любом случае будет исключена из неё. Затем с помощью ЦАП по цифровой модели побочного сигнала $x_n(k)$ по выражению (5) формируется непрерывный сигнал $x_n(t)$. Поэтому максимальная амплитуда сигнала на входе второго АЦП ADC_2 теоретически будет

$$X_{\max} = X_{0, \max}, \quad (6)$$

что гораздо меньше, чем максимальная амплитуда согласно формуле (4). Это позволит уменьшить вес младшего разряда второго АЦП. Как следует из выражений (4) и (6), уменьшение веса младшего разряда АЦП будет кратно величине

$$\eta = \frac{X_{0, \max} + X_{n, \max}}{X_{0, \max}} = 1 + \chi,$$

где $\chi = X_{n, \max} / X_{0, \max}$.

Значит, эффект от использования системы активно-адаптивного распознавания тем выше, чем

больше отношение амплитуд побочной $x_n(t)$ и выделяемой $x_0(t)$ слагаемых (чем больше χ).

Система сохраняет работоспособность при изменении частоты выделяемой слагаемой в широких пределах, поскольку использует операции, свойства которых не зависят от частоты.

Экспериментальные исследования. С целью подтверждения характеристик изложенного метода разработан и испытан опытный образец устройства защиты генератора от ОЗЗ с активно-адаптивным трактом АЦП (рис. 3). В ходе испытаний осуществлялось распознавание третьей гармоники тока на фоне преобладающей основной гармоники.

На рис. 2 и 4 показаны результаты распознавания третьей гармоники тока при отношениях амплитуды третьей гармоники к амплитуде основной гармоники соответственно 10^{-4} и $5 \cdot 10^{-4}$. Видно, что предлагаемая система активно-адаптивного распознавания оценивает действующие значения информационной слагаемой с точностью 1% при отношении $I_0/I_n = 5 \cdot 10^{-4}$ (рис. 4, з). В то время как распознавание непосредственно по отсчётам сигнала $i(k)$ имеет недопустимо большую погрешность (около 32%, рис. 4, б). Уменьшение отношения I_0/I_n до 10^{-4} делает оценивание действующего значения информационной слагаемой непосредственно по отсчётам $i(k)$ невозможным (рис. 2, б), хотя в то же время система активно-адаптивного распознавания оценивает амплитуду информационной слагаемой с точностью 18% (рис. 2, з).

Выводы

1. Метод активно-адаптивного распознавания сигналов позволяет выделить информационную

слагаемую, не доступную для непосредственного измерения. В отличие от классического подхода, основанного на применении аналоговых режекторных фильтров с высокой добротностью, метод обладает стабильностью характеристик преобразования и сохраняет высокую точность при девиации частоты информационной слагаемой.

2. Испытания опытного образца устройства защиты генератора от ОЗЗ с активно-адаптивным трактом АЦП подтвердили техническое совершенство предложенного метода. Активно-адаптивный метод распознавания сигналов открывает возможность для разработки высокочувствительных защит генератора от ОЗЗ с широким рабочим диапазоном частот.

Список литературы

1. Солдатов, А. В. Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших гармоник дифференциального тока [Текст] / А. В. Солдатов, В. И. Антонов, В. А. Наумов, Н. Г. Иванов, М. И. Александрова // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 3 (24). – С. 12 – 20.
2. Кискачи, В. М. Использование гармоник э.д.с. генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю [Текст] / В. М. Кискачи // Электричество. – 1974. – № 2. – С. 24 – 29.
3. Антонов, В. И. Оценка гармоник электрической величины на фоне преобладающего гармонического спектра шума [Текст] / В. И. Антонов, В. А. Наумов, А. В. Солдатов, Н. В. Егоров // Электричество. – 2014. – № 5. – С. 29 – 33.
4. Вайнштейн, Р. А. Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования

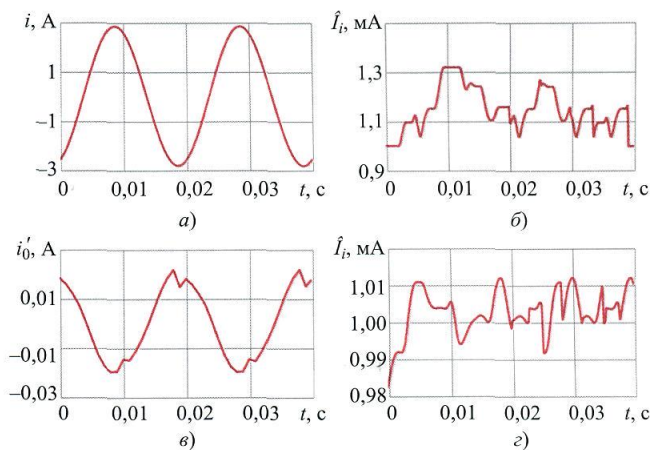


Рис. 4. Распознавание информационной слагаемой сигнала по выражению (2) при $I_0 = 0,001$ А, $I_n = 2$ А (отношение сигнал/шум равно $5 \cdot 10^{-4}$):

а – входной сигнал; б – оценка действующего значения информационной слагаемой непосредственно по отсчетам сигнала $i(k)$; в – сигнал $i_0(k)$ после активно-адаптивного подавления побочного сигнала (отношение сигнал/шум повышено до $600 \cdot 10^{-4}$); г – оценка действующего значения информационной слагаемой в сигнале $i_0(k)$

- низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности [Текст]: автореф. дис. ...доктора техн. наук / Р. А. Вайнштейн. – Томск, 2011. – 45 с.
5. Способ выделения слагаемой электрической величины [Текст]: пат. 2564536 Рос. Федерация: G01R 23 / 167 / Антонов В. И., Наумов В. А., Солдатов А. В., Иванов Н. Г.; заявитель и патентообладатель ООО НПП “ЭКРА”. – № 2014125935 / 07; заявл. 26.06.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

С начала 2016 г. редакция журнала «Электрические станции» принимает статьи только через сайт журнала: www.elst.energy-journals.ru (статьи в журнал «Энергохозяйство за рубежом» — через сайт: www.ehz.energy-journals.ru). Пожалуйста, зарегистрируйтесь как автор на сайте и передайте статью, следуя пошаговой инструкции. Если что-то не будет получаться, обращайтесь в редакцию.

Передав статью через сайт, вы будете наблюдать весь путь прохождения своей статьи — от рецензии до вёрстки! Вы сможете внести правки после редактирования, посмотреть вёрстку и сделать свои замечания, предложения и др.

Редакция