

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 23683

(13) С1

(46) 2022.04.30

(51) МПК

H 02H 3/00 (2006.01)

## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВХОДНОГО СИГНАЛА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

(21) Номер заявки: а 20200122

(22) 2020.04.23

(43) 2021.12.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Романюк Федор Алексеевич; Румянцев Владимир Юрьевич; Румянцев Юрий Владимирович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) РОМАНЮК Ф.А. и др. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок. Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2019, т. 62, № 5, с. 403-412.

ВУ 20808 С1, 2017.

RU 2556864 С1, 2015.

SU 1091082 А, 1984.

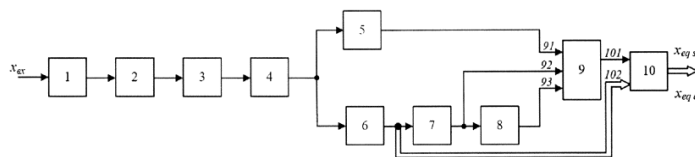
US 6757146 В2, 2004.

РОМАНЮК Ф.А. и др. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты. Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2019, т. 62, № 1, с. 5-14.

РОМАНЮК Ф.А. и др. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах электроустановок. Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2006, № 5, с. 5-11.

(57)

Устройство для формирования ортогональных составляющих входного сигнала релейной защиты электроэнергетического объекта, содержащее последовательно соединенные входной преобразователь, соединяемый входом с измерительным трансформатором защищаемого электроэнергетического объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой



Фиг. 1

преобразователь и оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения входного сигнала и со входом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала, а выход последнего подключен ко входу блока определения характера изменения входного сигнала, выполненного с возможностью формирования показателя  $l$  изменения сигнала, равного 1 в случае нарастания сигнала или 0 в случае неизменного характера сигнала или его спада; выполненный с возможностью определения корректирующего коэффициента  $k_n$  блок определения корректирующего коэффициента, соединенный соответственно первым входом с выходом блока определения амплитудного значения входного сигнала, вторым входом - с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала и третьим входом - с выходом блока определения характера изменения входного сигнала; соединенный первым входом с выходом блока определения корректирующего коэффициента и вторым входом с выходом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала блок формирования ортогональных составляющих сигнала, эквивалентного входному сигналу, выполненный с возможностью вычисления синусной и косинусной ортогональных составляющих упомянутого сигнала, каждая из которых равна произведению корректирующего коэффициента  $k_n$  на величину соответствующей синусной или косинусной ортогональной составляющей основной гармоники входного сигнала, сформированных в блоке формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала; при этом корректирующий коэффициент  $k_n$  определен из выражения:

$$k_n = 1 \cdot \left( d \cdot \left( \frac{X_{m\text{вх}n}}{X_{m\text{л}n}} - 1 \right) + 1 \right) + 1 - 1,$$

где  $d$  - постоянный безразмерный коэффициент, равный 2,4;

$X_{m\text{вх}n}$  - амплитудное значение входного сигнала;

$X_{m\text{л}n}$  - амплитудное значение основной гармоники входного сигнала.

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в области релейной защиты для повышения быстродействия цифровых измерительных органов (ЦИО) микропроцессорных защит электроустановок, которые реализуются на основе обработки ортогональных составляющих (ОС) входных сигналов.

Использование ОС является генеральным направлением определения информационных параметров сигналов в микропроцессорной релейной защите и автоматике электроэнергетических систем, поскольку позволяет реализовать большинство измерительных органов, применяемых в современных устройствах защиты и автоматики. Так, при использовании ОС одного сигнала можно вычислять амплитудные, действующие значения, текущие фазы, аварийные составляющие входного сигнала. По ОС двух сигналов возможно определение таких параметров, как сопротивление, мощность и их направление, разности фаз и др. При использовании ОС большего числа сигналов можно рассчитывать различные параметры трехфазных систем.

Основное влияние на быстродействие алгоритмов формирования ОС входного сигнала оказывают два фактора. Первый из них связан с появлением при повреждениях в контролируемых сигналах аperiodических и гармонических составляющих, обусловленных переходными процессами и нелинейностью элементов электроустановки, а второй - с инерционностью алгоритмов обработки информации, в частности аналоговой и цифровой фильтрацией. В результате недопустимо затягивается время определения достоверных значений ортогональных составляющих.

Известно цифровое устройство формирования ортогональных составляющих входных сигналов (ЦУФОС), которое входит в состав ЦИО [1] и включает соединенные последовательно входной преобразователь, вход которого подключен к измерительному трансформатору защищаемого объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен с входом блока формирования ортогональных составляющих, а на выходе последнего содержатся ортогональные составляющие основной гармоники входного сигнала.

Как в большинстве существующих микропроцессорных защит, так и в известном ЦУФОС, выделение ОС входного сигнала осуществляется с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Недостатками ДПФ являются невысокое быстродействие, составляющее более одного периода основной частоты, а также влияние свободной аperiodической составляющей, создающей, в зависимости от постоянной времени ее затухания, погрешность преобразования до 10-15 %.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению по технической сущности и достигаемому результату является ЦУФОС в цифровом измерительном органе [2], содержащее последовательно соединенные входной преобразователь, вход которого подключен к измерительному трансформатору защищаемого объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен со входом блока определения действующего значения вторичного входного сигнала и входом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала, выход которого соединен со входом блока определения действующего значения основной гармоники вторичного сигнала, а выход последнего подключен ко входу знаменателя блока деления, вход числителя которого соединен с выходом блока определения действующего значения вторичного входного сигнала; блок возведения в квадрат, вход которого соединен с выходом блока деления, а выход соединен с первым входом блока формирования ортогональных составляющих эквивалентного сигнала, на второй вход которого поступает выходной сигнал блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала, а выход содержит значения синусной и косинусной ортогональных составляющих эквивалентного сигнала.

Указанное устройство обладает высоким быстродействием в переходном режиме при резком возрастании амплитуды входного сигнала. Однако в послеаварийном режиме и при спаде контролируемого сигнала значение корректирующего коэффициента в силу его зависимости от частоты остается отличным от единицы, и достоверность определения эквивалентного сигнала существенно ухудшается в сравнении с выходным сигналом ЦУФОС на основе ДПФ.

Задача, решаемая изобретением, состоит в расширении функциональных возможностей и повышении быстродействия цифрового устройства формирования ОС входных сигналов релейной защиты.

Поставленная задача решается тем, что устройство формирования ортогональных составляющих входного сигнала релейной защиты электроэнергетического объекта, содержащее последовательно соединенные входной преобразователь, соединенный входом с измерительным трансформатором защищаемого электроэнергетического объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь и оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения входного сигнала и со входом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала, а выход последнего подключен ко входу блока определения характера изменения входного сигнала, выполненного с возможностью формирования показателя / изменения сигнала, равного 1 в случае нарастания сигнала или 0 в случае неизменного характера сигнала или его спада; выполненный с возможностью определения корректирующего коэффициента  $k_n$  блок определе-

ния корректирующего коэффициента, соединенный соответственно первым входом с выходом блока определения амплитудного значения входного сигнала, а второй входом - с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала и третьим входом - с выходом блока определения характера изменения входного сигнала; соединенный первым входом с выходом блока определения корректирующего коэффициента и вторым входом с выходом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала блок формирования ортогональных составляющих сигнала, эквивалентного входному сигналу, выполненный с возможностью вычисления синусной и косинусной ортогональных составляющих упомянутого сигнала, каждая из которых равна произведению корректирующего коэффициента  $k_n$  на величину соответствующей синусной или косинусной ортогональной составляющей основной гармоники входного сигнала, сформированных в блоке формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала; при этом корректирующий коэффициент  $k_n$  определен из выражения:

$$k_n = 1 \cdot \left( d \cdot \left( \frac{X_{m\text{вх}n}}{X_{m\text{лн}}} - 1 \right) + 1 \right) + 1 - 1,$$

где  $d$  - постоянный безразмерный коэффициент, равный 2,4;

$X_{m\text{вх}n}$  - амплитудное значение входного сигнала;

$X_{m\text{лн}}$  - амплитудное значение основной гармоники входного сигнала.

Вычисление ОС эквивалентных сигналов производится по значениям косинусной  $x_{\text{сн}}$  и синусной  $x_{\text{сн}}$  ОС основной гармоники, сформированных с использованием ДПФ, путем их умножения на корректирующий коэффициент  $k_n$ .

Предлагаемое цифровое устройство формирования ОС входных сигналов релейной защиты отличается высоким быстродействием в переходных режимах, обладает широкими функциональными возможностями, позволяющими реализовать практически все применяемые в релейной защите измерительные органы. Основное условие реализуемости ЦУФОС на основе предложенной методики формирования ОС с положительным эффектом состоит в том, чтобы переходная характеристика алгоритма получения амплитудного значения входного сигнала была круче и располагалась выше аналогичной характеристики алгоритма формирования амплитудного значения основной гармоники указанного сигнала.

На фиг. 1 представлена структурная схема цифрового устройства формирования ОС входных сигналов релейной защиты, на фиг. 2, 3 - временные диаграммы эквивалентного выходного сигнала ЦИО, реализованного на основе предлагаемого ЦУФОС и выходного сигнала ЦИО, основанного на ДПФ, при синусоидальном входном воздействии промышленной частоты и при воздействии, приближенном к реальному вторичному току трансформатора тока соответственно.

Цифровое устройство формирования ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты содержит последовательно соединенные входной преобразователь 1, на вход которого поступает вторичный сигнал измерительного трансформатора защищаемого объекта, фильтр нижних частот 2, аналого-цифровой преобразователь 3, оперативное запоминающее устройство 4, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения входного сигнала 5 и входом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала 6, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала 7, а выход последнего подключен ко входу блока определения характера изменения входного сигнала 8; блок определения корректирующего коэффициента 9, вход 91 которого соединен с выходом блока определения амплитудного значения входного сигнала 5, вход 92 соединен с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала 7, а вход 93 соединен с выходом блока определения характера изменения входного сигнала 8; блок формирования ортогональных составляющих эквивалентно-

го сигнала 10, на выходе которого формируются синусная и косинусная ортогональные составляющие эквивалентного сигнала, а входы 101 и 102 соответственно соединены с выходом блока определения корректирующего коэффициента 9 и с выходом блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала 6.

Входной преобразователь 1 преобразует входной вторичный сигнал  $x_{вх}$ , поступающий от измерительного трансформатора защищаемого объекта, в пропорциональный сигнал напряжения. Входной преобразователь представляет собой промежуточный трансформатор с экраном между первичной и вторичной обмотками для обеспечения помехоустойчивости формирователя ОС.

Фильтр нижних частот 2 представляет собой активный фильтр 2-го порядка с многоконтурной обратной связью, выполненный на операционном усилителе и предназначенный для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации.

Аналого-цифровой преобразователь 3 осуществляет преобразование выборок выходного напряжения фильтра нижних частот в цифровой код.

Оперативное запоминающее устройство 4 выполняет функцию хранения последних  $n$  выборок входного сигнала, которые обрабатываются в последующих блоках.

Блок определения амплитудного значения входного сигнала  $X_{мвхп}$  5 функционирует согласно выражению:

$$X_{мвхп} = \sqrt{\frac{2}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_{вхп}^2}, \quad (1)$$

где  $n = 1 \dots N$  - номер выборки входного сигнала в окне наблюдения;

$x_{вхп}$  - выборки входного сигнала;

$N$  - число выборок на периоде промышленной частоты.

В основу реализации блока формирования ортогональных составляющих основной гармоники входного сигнала 6 положено ДПФ, при котором выделение косинусной  $x_{сн}$  и синусной  $x_{сн}$  ОС осуществляется по выражениям:

$$\begin{aligned} x_{сн} &= \sum_{n=1}^N a_{сн} \cdot x_{вхп}, \\ x_{сн} &= \sum_{n=1}^N a_{сн} \cdot x_{вхп}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a_{сн}$ ,  $a_{сн}$  - коэффициенты соответственно косинусного и синусного цифровых фильтров, которые вычисляются как:

$$\begin{aligned} a_{сн} &= \frac{2}{N} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \\ a_{сн} &= \frac{2}{N} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Блок определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала  $X_{млн}$  7 реализует выражение:

$$X_{млн} = \sqrt{x_{сн}^2 + x_{сн}^2}. \quad (4)$$

В блоке определения характера изменения входного сигнала 8 формируется показатель изменения сигнала  $I$ . Для этой цели фиксируются два смежных амплитудных значения основной гармоники входного сигнала  $X_{млн}$  и  $X_{мл(n-r)}$ , по которым вычисляется параметр  $P_n$ :

$$P_n = \frac{X_{млн}}{X_{мл(n-r)}} \cdot (1 - \epsilon),$$

где  $\varepsilon$  - постоянная, учитывающая уровень неравномерности отношения значений отсчетов основной гармоники входного сигнала.

Если выполняется условие  $P_n \leq 1$ , то показателю изменения сигнала присваивается значение  $l = 0$ , в противном случае  $l = 1$ .

В блоке определения корректирующего коэффициента 9 реализуется выражение, полученное в результате выполненных методом вычислительного эксперимента исследований, позволяющее учесть характер изменения сигнала:

$$k_n = 1 \cdot \left( d \cdot \left( \frac{X_{m\text{вхн}}}{X_{m\text{лн}}} - 1 \right) + 1 \right) + 1 - 1, \quad (5)$$

где  $d$  - постоянный безразмерный коэффициент.

В случае нарастания сигнала ( $l = 1$ ) корректирующий коэффициент принимает значение:

$$k_n = d \cdot \left( \frac{X_{m\text{вхн}}}{X_{m\text{лн}}} - 1 \right) + 1,$$

а при его неизменном характере или спаде ( $l = 0$ ) значение  $k_n = 1$ , что соответствует вычислению ОС сигнала по алгоритму ДПФ, согласно (2).

Численное значение  $d$  определяется временем установления выходного сигнала блока формирования ОС основной гармоники входного сигнала. Экспериментально установлено, что оптимальное значение  $d$ , при котором отсутствует перерегулирование переходной характеристики и достигается приемлемое быстродействие, составляет 2,4.

Блок формирования ортогональных составляющих эквивалентного сигнала 10 реализует функцию их вычисления по значениям  $x_{cn}$ ,  $x_{sn}$  и величине корректирующего коэффициента  $k_n$ :

$$\begin{aligned} x_{\text{eqcn}} &= k_n \cdot x_{cn}, \\ x_{\text{eqsn}} &= k_n \cdot x_{sn}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $x_{\text{eqcn}}$  и  $x_{\text{eqsn}}$  - ортогональные составляющие эквивалентного сигнала.

Все блоки и элементы структурной схемы цифрового устройства формирования ОС входных сигналов релейной защиты могут быть реализованы по известным схемам с использованием средств микроэлектронной и микропроцессорной техники.

При реализации ЦИО тока на базе предлагаемого цифрового устройства формирования ОС он будет работать следующим образом.

Входной ток  $i_{\text{вх}}$  от измерительного трансформатора тока (на фиг. 1 отсутствует) защищаемого объекта поступает на вход входного преобразователя, выходной сигнал которого пропорционален  $i_{\text{вх}}$ . Фильтр нижних частот 2 ограничивает спектр входного сигнала. Аналого-цифровой преобразователь 3 формирует последовательность выборок из поступающего на его вход выходного сигнала фильтра нижних частот с шагом дискретизации:

$$\Delta t = \frac{T}{N}, \quad (7)$$

где  $T$  - период промышленной частоты.

Полученные на выходе аналого-цифрового преобразователя 3 выборки на протяжении всего периода наблюдения после включения ЦИО поступают в буфер оперативного запоминающего устройства 4, формируя окно наблюдения.

Выборки сигнала, хранящиеся в буфере, поступают на входы блока определения амплитудного значения входного сигнала 5, по которым в соответствии с (1) определяется  $I_{m\text{вхн}}$ , и блока формирования ОС основной гармоники входного сигнала 6, где в соответствии с (2) вычисляются ОС основной гармоники входного тока  $i_{cn}$ ,  $i_{sn}$ .

На вход блока определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала 7 подаются ОС  $i_{cn}$  и  $i_{sn}$ , по которым вычисляется амплитудное значение основной гармоники входного тока  $I_{m\text{лн}}$  в соответствии с (4).

В блоке определения характера изменения входного сигнала 8 по двум смежным амплитудным значениям основной гармоники входного тока и постоянной  $\varepsilon$  вычисляется параметр  $P_n$ , в зависимости от знака которого формируется показатель изменения сигнала  $l$ : при возрастании сигнала  $l = 1$ , а в остальных случаях  $l = 0$ .

На входы 91 и 92 блока определения корректирующего коэффициента 9 поступают соответственно амплитудные значения входного тока  $I_{mvxn}$  и его первой гармоники  $I_{mln}$ , а на вход 93 от блока определения характера изменения входного сигнала 8 подается показатель изменения сигнала  $l$ . По указанным параметрам с учетом безразмерного коэффициента  $d = 2,4$ , согласно выражению (5), вычисляется корректирующий коэффициент  $k_n$ , значение которого подается на вход 101 блока формирования ОС эквивалентного сигнала 10, а на вход 102 указанного блока поступают ОС основной гармоники входного тока  $i_{cn}$  и  $i_{sn}$ . На выходе блока формирования ОС эквивалентного сигнала 10 по выражению (6) формируются эквивалентные ОС входного тока  $i_{eqcn}$  и  $i_{eqsn}$ , по которым вычисляется амплитудное значение эквивалентного сигнала  $I_{meqn}$ .

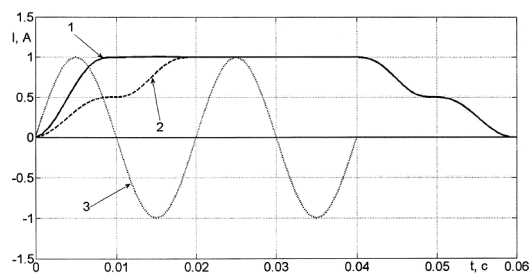
Результаты исследований ЦИО на основе предлагаемого устройства формирования ОС и ЦИО на основе ДПФ были получены методом вычислительного эксперимента с помощью комплексной математической модели, включающей модели энергосистемы, защищаемого объекта, измерительного трансформатора тока, а также моделей вышеназванных ЦИО.

На фиг. 2 представлены результаты функционирования модели ЦИО с предлагаемым ЦУФОС (кривая 1) и модели ЦИО на основе ДПФ (кривая 2) при синусоидальном входном воздействии единичной амплитуды частотой 50 Гц (кривая 3). Время установления эквивалентного сигнала  $I_{meqn}$  составляет менее 0,5 периода промышленной частоты, что в 2 с лишним раза быстрее, чем у ЦИО на основе ДПФ. В установившемся режиме и при спаде сигнала оба ЦИО функционируют идентично.

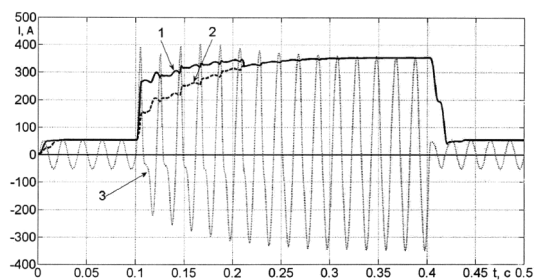
На фиг. 3 приведены результаты расчетов для тех же ЦИО, но с использованием воздействия, приближенного к реальному вторичному току трансформатора тока (ТТ), к которому подключены указанные ЦИО при коротком замыкании (КЗ). В промежутке времени  $t = 0,00-0,1$  с моделируется доаварийный режим, при котором вторичный ток ТТ (контролируемый сигнал) синусоидален. В момент времени  $t = 0,1$  с происходит трехфазное КЗ - аварийный режим, при котором форма вторичного тока ТТ искажается (кривая 3). При этом время нарастания выходных сигналов у рассматриваемых ЦИО в переходном режиме существенно различается: у ЦИО с предлагаемым ЦУФОС выходной сигнал формируется быстрее (кривая 1) и располагается выше выходного сигнала ЦИО на основе ДПФ (кривая 2). Так продолжается до момента времени  $t = 0,22$  с, когда заканчивается переходный процесс и форма вторичного тока ТТ становится синусоидальной. В послеаварийном режиме и при исчезновении сигнала функционирование ЦИО с предлагаемым ЦУФОС не отличается от ЦИО на основе ДПФ.

Источники информации:

1. ДЬЯКОВ А.Ф. и др. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. Москва: Издательский дом МЭИ, 2008, 336 с.
2. РОМАНЮК Ф.А. и др. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал, 2019, т. 62, № 5, с. 403-413.



Фиг. 2



Фиг. 3