

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **20808**

(13) **С1**

(46) **2017.02.28**

(51) МПК

H 02H 3/08 (2006.01)

(54) **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН ТОКА ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА
ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА**

(21) Номер заявки: а 20150485

(22) 2015.10.07

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

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

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

(56) US 6757146 B2, 2004.

ВУ 2130 С1, 1998.

ВУ 16960 С1, 2013.

RU 2133539 С1, 1999.

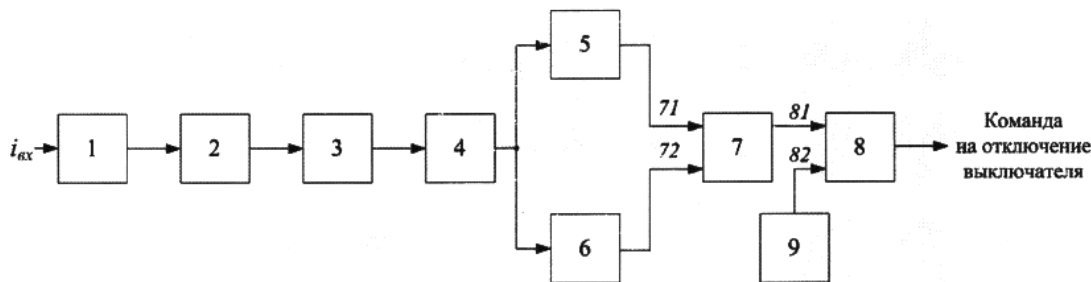
SU 1646020 А1, 1991.

KZ 21962 А4, 2009.

US 7738227 В2, 2010.

(57)

Измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока, содержащий последовательно соединенные входной преобразователь тока, вход которого подключен к измерительному трансформатору тока защищаемого объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока и входом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока; блок формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока, первый вход которого соединен с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока, а второй вход - с выходом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока; блок сравнения, первый и второй входы которого соединены соответственно с выходом блока формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока и выходом блока задания уставок, а выход подключен к внешним устройствам, отключающим выключатель защищаемого объекта при выполнении условия срабатывания измерительного органа.



Фиг. 1

ВУ 20808 С1 2017.02.28

BY 20808 C1 2017.02.28

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в области релейной защиты электроэнергетических систем для объектов, в токах повреждения которых содержится значительная апериодическая составляющая, которая является одним из основных факторов, приводящих к насыщению стали магнитопровода трансформатора тока, что в свою очередь вызывает нарушение условий точной трансформации первичного тока.

Известно реле, содержащее входной преобразователь тока, выпрямитель и фильтр низких частот, соединенные последовательно, блок задания уставки, исполнительный элемент, однокристалльный микроконтроллер и аналого-цифровой преобразователь, который соединен посредством аналогового входа с выходом фильтра нижних частот, а цифрового выхода - с первым входом однокристалльного микроконтроллера, второй вход которого соединен с выходом блока задания уставки, а первый и второй выходы соединены соответственно с управляющим входом аналого-цифрового преобразователя и исполнительным элементом [1].

Реле может быть использовано для построения быстродействующих устройств релейной защиты и автоматики и реализовано с помощью известных элементов, выполненных на микроэлектронной элементной базе.

Недостатками известного реле является то, что реагируя на действующее значение вторичного тока трансформатора тока, оно не учитывает степень насыщения его магнитопровода. Однако при наличии значительной апериодической составляющей в токе повреждения и номинальных параметрах трансформатора тока, выбранных из условия установившегося уровня токов повреждения, кривая вторичного тока в первые несколько периодов после короткого замыкания оказывается значительно искаженной, ее амплитуда, а следовательно, и действующее значение - существенно занижены по сравнению с истинным значением, что может приводить к отказу срабатывания реле.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению по технической сущности и достигаемому результату является элемент токовой отсечки для функционирования при искаженной форме вторичного тока трансформатора тока [2], содержащий входной преобразователь тока, вход которого подключен к измерительному трансформатору тока защищаемого объекта, фильтр низких частот, аналого-цифровой преобразователь, оперативное запоминающее устройство, соединенные последовательно, блок определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока, блок определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока, биполярный пиковый детектор, входы которых соединены с выходом оперативного запоминающего устройства, блок определения индекса искажения, первый вход которого соединен с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока, второй вход соединен с выходом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока, а выход подключается ко входу таймера, который своим выходом соединяется с управляющим входом переключателя, первый и второй входы которого подключаются соответственно к выходу биполярного пикового детектора и выходу блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока, компаратор, первый вход которого соединяется с выходом переключателя, на второй вход подается выходной сигнал блока задания уставки, а выход подключается к внешним устройствам, формирующим команду на отключение выключателя защищаемого объекта.

Элемент токовой отсечки состоит из двух основных каналов формирования выходного сигнала, управляемых переключателем: цифрового косинусного фильтра, который работает в нормальном режиме и при незначительном насыщении магнитопровода трансформатора тока и быстродействующего биполярного пикового детектора, который функционирует в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока.

Цифровой косинусный фильтр представляет собой модификацию дискретного преобразования Фурье, в котором используется только косинусная ортогональная составляющая, а синусная ортогональная составляющая формируется путем сдвига косинусной на 90° . Цифровой косинусный фильтр требует меньше математических операций по сравнению с дискретным преобразованием Фурье для выделения амплитуды основной гармоники из сигнала, содержащего высшие гармоники и аperiodическую составляющую.

Биполярный пиковый детектор позволяет определять амплитуду сигнала как сумму абсолютных значений максимума положительной и минимума отрицательной полуволн контролируемого сигнала.

Уровень насыщения трансформатора тока определяется по индексу искажения DI в соответствии с выражением:

$$DI = 1 + \sqrt{\frac{2I^2 - I_{m1}^2}{I_{m1}^2}} = 1 + THD, \quad (1)$$

где I - действующее значение полного сигнала, I_{m1} - амплитудное значение 1-ой гармоники сигнала, $THD = \sqrt{\frac{2I^2 - I_{m1}^2}{I_{m1}^2}}$ - коэффициент нелинейных искажений сигнала.

В [2] установлено, что $DI_{max} = 1,75$ является пороговым значением индекса искажения, при котором происходит переключение каналов. При подстановке в выражение (1) $DI = DI_{max}$ получается условие для функционирования переключателя каналов:

$$I^2 > 0,78125I_{m1}^2, \quad (2)$$

которое формируется и проверяется в блоке определения индекса искажения.

Если условие (2) не выполняется (величина $DI < 1,75$), это свидетельствует о незначительном насыщении магнитопровода трансформатора тока (в пределе, для сигнала без высших гармоник $DI = 1$). В этом случае выходной сигнал элемента токовой отсечки определяется цифровым косинусным фильтром 1-ой гармоники.

Если условие (2) выполняется (величина $DI > 1,75$), то считается, что магнитопровод трансформатора тока вошел в глубокое насыщение и амплитуда сигнала определяется быстродействующим биполярным пиковым детектором.

Для отстройки от возможных кратковременных превышений максимального значения индекса искажения DI, возникающих в переходных режимах, используется таймер, который управляет переключателем. Сигнал на его выходе появляется только в том случае, если продолжительность выполнения условия $DI > 1,75$ составляет не менее полупериода промышленной частоты.

Однако при наличии аperiodической составляющей в токе короткого замыкания положительные и отрицательные полуволны сигнала значительно отличаются друг от друга по амплитуде, что приводит к затягиванию времени установления сигнала на выходе биполярного пикового детектора. Кроме того, вблизи порога переключения таймер блокирует включение канала пикового детектора и амплитуда сигнала определяется цифровым косинусным фильтром. Известно, что применение косинусного цифрового фильтра для частного случая сигнала, содержащего аperiodическую составляющую помимо основной гармоники, имеет преимущество в части качества определения амплитуды основной гармоники по сравнению с цифровым фильтром, реализующим дискретное преобразование Фурье. Однако из-за формирования синусной ортогональной составляющей путем задержки косинусной ортогональной составляющей на четверть периода промышленной частоты определение амплитуды основной гармоники сигнала цифровым косинусным фильтром не может происходить быстрее, чем за 1,25 периода промышленной частоты.

Задача, решаемая изобретением, состоит в повышении быстродействия и упрощении реализации измерительного органа тока.

Поставленная задача решается измерительным органом тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока, содержащим последовательно соединенные входной преобразователь тока, вход которого подключен к измерительному трансформатору тока защищаемого объекта, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, оперативное запоминающее устройство, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока и входом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока; блок формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока, первый вход которого соединен с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока, а второй вход - с выходом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока; блок сравнения, первый и второй входы которого соединены соответственно с выходом блока формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока и выходом блока задания уставок, а выход подключен к внешним устройствам, отключающим выключатель защищаемого объекта при выполнении условия срабатывания измерительного органа.

Блок формирования эквивалентного сигнала обеспечивает вычисление амплитудного значения выходного сигнала измерительного органа тока в функции коэффициента нелинейных искажений THD и амплитудного значения основной гармоники $I_{meq} = f(THD, I_{m1})$. Поскольку в [2] определено пороговое значение индекса искажения $DI_{max} = 1,75$, то пороговое значение коэффициента нелинейных искажений будет на 1 меньше, т.е. $THD_{max} = 0,75$.

Поэтому целесообразно формировать амплитудное значение эквивалентного сигнала на выходе измерительного органа тока так, чтобы в области слабого насыщения магнитопровода трансформатора тока (значение THD находится в диапазоне от 0 до 0,3) он мало отличался по амплитуде от сигнала основной гармоники $I_{meq} \approx I_{m1}$, а в области глубокого насыщения ($THD > 0,75$) выполнялось условие $I_{meq} \gg I_{m1}$. В переходной области (значение THD находится в диапазоне от 0,3 до 0,75) должно выполняться условие $I_{meq} > I_{m1}$, т.е. эквивалентный сигнал должен плавно нарастать.

Наиболее простая нелинейная зависимость, позволяющая выполнить указанные условия:

$$I_{meq} = (THD^2 + 1)I_{m1} = kI_{m1},$$

где k - безразмерный коэффициент в функции THD, который определяет превышение амплитуды эквивалентного сигнала I_{meq} над амплитудой сигнала основной гармоники I_{m1} и рассчитывается как:

$$k = \frac{I_{meq}}{I_{m1}} = (THD^2 + 1) = \frac{2I^2}{I_{m1}^2}. \quad (3)$$

Тогда, амплитуда эквивалентного сигнала вычисляется как:

$$I_{meq} = kI_{m1} = \frac{2I^2}{I_{m1}}, \quad (4)$$

а действующее значение выходного сигнала:

$$I_{eq} = \frac{I_{meq}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \frac{I^2}{I_{m1}}. \quad (5)$$

На фиг. 1 представлена структурная схема для одной фазы измерительного органа тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока, на фиг. 2 приведена зависимость $\frac{I_m}{I_{m1}} = f(THD)$, а на фиг. 3 - амплитудные значения выходных сигналов предлагаемого измерительного органа тока и прототипа.

Измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока содержит последовательно соединенные входной преобразователь тока 1, вход которого подключен к измерительному трансформатору тока защищаемого объекта, фильтр нижних частот 2, аналого-цифровой преобразователь 3, оперативное запоминающее устройство 4, выход которого соединен со входом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока 5 и входом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока 6; блок формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока 7, вход 71 которого соединен с выходом блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока 5, а вход 72 - с выходом блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока 6; блок сравнения 8, входы 81 и 82 которого соединены соответственно с выходом блока формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока 7 и выходом блока задания уставок 9, а выход подключен к внешним устройствам, отключающим выключатель защищаемого объекта при выполнении условия срабатывания измерительного органа.

Входной преобразователь тока 1 преобразует контролируемый вторичный ток трансформатора тока в пропорциональный сигнал напряжения и представляет собой промежуточный трансформатор с экраном между первичной и вторичной обмотками для повышения помехоустойчивости измерительного органа тока.

Фильтр низких частот 2 представляет собой активный фильтр 2-го порядка с многоконтурной обратной связью, выполненный на операционном усилителе. Назначение фильтра заключается в подавлении спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации (антиалиасинговый фильтр).

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

Оперативное запоминающее устройство 4 предназначено для хранения последних N цифровых отсчетов выходного сигнала аналого-цифрового преобразователя, по которым в последующих блоках формируются его амплитудное и действующее значения.

В основу реализации блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока I_{m1} 5 положено дискретное преобразование Фурье [3], при котором по отсчетам косинусной $I_{m1}^C(n)$ и синусной $I_{m1}^S(n)$ ортогональным составляющим определяется амплитуда основной гармоники сигнала $I_{m1}(n)$ как:

$$\begin{aligned} I_{m1}^C(n) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cos(2pn / N); \\ I_{m1}^S(n) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \sin(2pn / N); \\ I_{m1}(n) &= \sqrt{(I_{m1}^S(n))^2 + (I_{m1}^C(n))^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $n = 0 \dots N-1$ - номер цифрового отсчета контролируемого сигнала в окне наблюдения; $i(n)$ - отсчеты входного сигнала; N - число отсчетов на период промышленной частоты.

Блок определения квадрата действующего значения вторичного тока I^2 трансформатора тока 6 представляет собой цифровой фильтр с единичными коэффициентами, который реализуется согласно выражению:

$$I^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} i^2(n). \quad (7)$$

В блоке формирования эквивалентного сигнала измерительного органа тока 7, по результатам расчетов амплитуды основной гармоники вторичного тока трансформатора тока I_{m1} и квадрата действующего значения полного сигнала I^2 , вычисляются амплитудное I_{meq} и действующее значения эквивалентного сигнала I_{eq} , а также величина коэффициента k .

В переходных режимах состав высших гармоник во вторичном токе трансформатора тока, в силу различных, в том числе и сложно учитываемых факторов, может резко возрастать, потому коэффициент k должен быть ограничен. Оптимальный уровень ограничения оценивается по величине THD_{\max} , при этом отношение амплитуды полного тока к амплитуде 1-ой гармоники вторичного тока трансформатора тока определяется как:

$$\frac{I_m}{I_{m1}} = \sqrt{\text{THD}_{\max}^2 + 1}. \quad (8)$$

Так, при $\text{THD}_{\max} = 0,75$, отношение $\frac{I_m}{I_{m1}} = 1,25$. В [2] отмечается, что при глубоком насыщении стали магнитопровода трансформатора тока индекс искажения $DI = \text{THD} + 1$ может достигать значений $DI \gg 2$. Поэтому можно рекомендовать ограничение «сверху» на уровне значения THD_{\max} , находящегося в диапазоне от 1 до 2. На фиг. 2 представлена зависимость $\frac{I_m}{I_{m1}} = f(\text{THD})$, построенная по выражению (8) для значения $\text{THD}_{\max} = \sqrt{2}$, при котором $\frac{I_m}{I_{m1}} = \sqrt{3}$, а $k_{\max} = 3$.

Блок сравнения 8 сопоставляет действующее значение эквивалентного сигнала I_{eq} с уставкой, которая формируется в блоке задания уставок. Блок задания уставок 9 предназначен для дискретного изменения уровня срабатывания измерительного органа тока и выполнен на основе задатчиков двоично-десятичного кода.

Все блоки и элементы функциональной схемы измерительного органа тока могут быть реализованы по известным схемам на базе средств аналоговой и цифровой техники. В качестве последней целесообразно использовать современные микропроцессорные средства.

Измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока работает следующим образом. Входной ток $i_{\text{вх}}$ от измерительного трансформатора тока (на фиг. 1 не показан) защищаемого объекта поступает на вход входного преобразователя тока 1, выходной сигнал которого пропорционален фазному току. Фильтр низких частот 2 ограничивает спектр входного сигнала. Аналого-цифровой преобразователь 3 формирует последовательность цифровых отсчетов из поступающего на его вход выходного сигнала фильтра низких частот с заданным шагом дискретизации $\Delta t = \frac{T_1}{N}$, где T_1 - период сигнала промышленной частоты.

Полученные цифровые отсчеты выходного сигнала аналого-цифрового преобразователя на протяжении всего периода наблюдения после включения измерительного органа тока поступают в оперативное запоминающее устройство 4, формируя окно наблюдения. Оперативное запоминающее устройство имеет два настраиваемых параметра - шаг дискретизации Δt и число ячеек памяти (буфер), равное N . До тех пор, пока буфер полностью не заполнится новыми отсчетами в количестве, равном N , т.е. на протяжении периода наблюдения, равного по времени T_1 , величины контролируемых сигналов будут определяться неверно, и поэтому их целесообразно игнорировать.

Цифровые отсчеты сигнала, хранящиеся в буфере, поступают на входы: блока определения амплитудного значения основной гармоники вторичного тока трансформатора тока 5, по которым в соответствии с (6) определяется сигнал I_{m1} , и блока определения квадрата действующего значения вторичного тока трансформатора тока 6, по которым в соответствии с (7) определяется I^2 .

На вход 71 блока формирования эквивалентного сигнала измерительного органа 7 подается сигнал I_{m1} , а на вход 72 этого же блока - сигнал I^2 . В блоке 7 сигнал I_{m1} возводится в квадрат, а сигнал I^2 удваивается и определяется коэффициент k в соответствии с (3). Далее величина коэффициента k ограничивается на уровне k_{\max} и умножается на выходной

BY 20808 C1 2017.02.28

сигнал блока 5, формируя по выражению (4) амплитудное значение эквивалентного сигнала I_{meq} , а по (5) - его действующее значение I_{eq} , которое подается на 81 вход блока сравнения 8, где сопоставляется с уставкой срабатывания, которая от блока задания уставок 9 подается на 82 вход блока сравнения 8. Если I_{eq} превышает уставку срабатывания, то на выходе блока 8 формируется разрешающий сигнал на срабатывание измерительного органа тока.

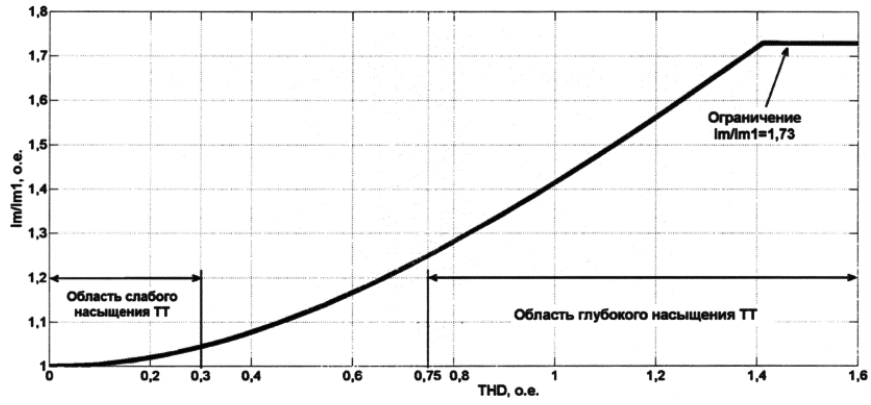
Результаты расчетов, представленные на фиг. 3, были получены с помощью комплексной математической модели, которая включает в себя математические модели энергосистемы, защищаемого объекта, трансформатора тока, а также предлагаемого измерительного органа тока и его прототипа.

В промежутке времени от 0 до 0,04 с длится нормальный режим, индекс искажения $DI = 1$ и выходные сигналы обоих устройств определяются по амплитудным значениям первой гармоники I_{m1} 14. При $t = 0,04$ с происходит трехфазное короткое замыкание, а в момент времени $t = 0,05$ с трансформатор тока входит в режим глубокого насыщения, его вторичный ток 10 искажается и снижается по амплитуде в сравнении с идеально трансформируемым током 11. Индекс искажения в прототипе устанавливается и сохраняется на уровне $DI > 1,75$ примерно один период промышленной частоты, что позволяет переключить канал измерения с цифрового косинусного фильтра на канал быстродействующего пикового детектора 13. В предлагаемом измерительном органе тока в течение первого послеаварийного полупериода промышленной частоты ($t = 0,04 - 0,05$ с) наблюдается резкое увеличение коэффициента нелинейных искажений THD, а следовательно, и амплитудного значения эквивалентного сигнала I_{meq} 12, которое определяется согласно (4). По мере затухания аperiodической составляющей в токе короткого замыкания форма вторичного тока трансформатора тока 10 приближается к идеальному току 11, а разница между выходными сигналами измерительного органа тока 12 и прототипа 13 уменьшается, становясь со временем равной нулю.

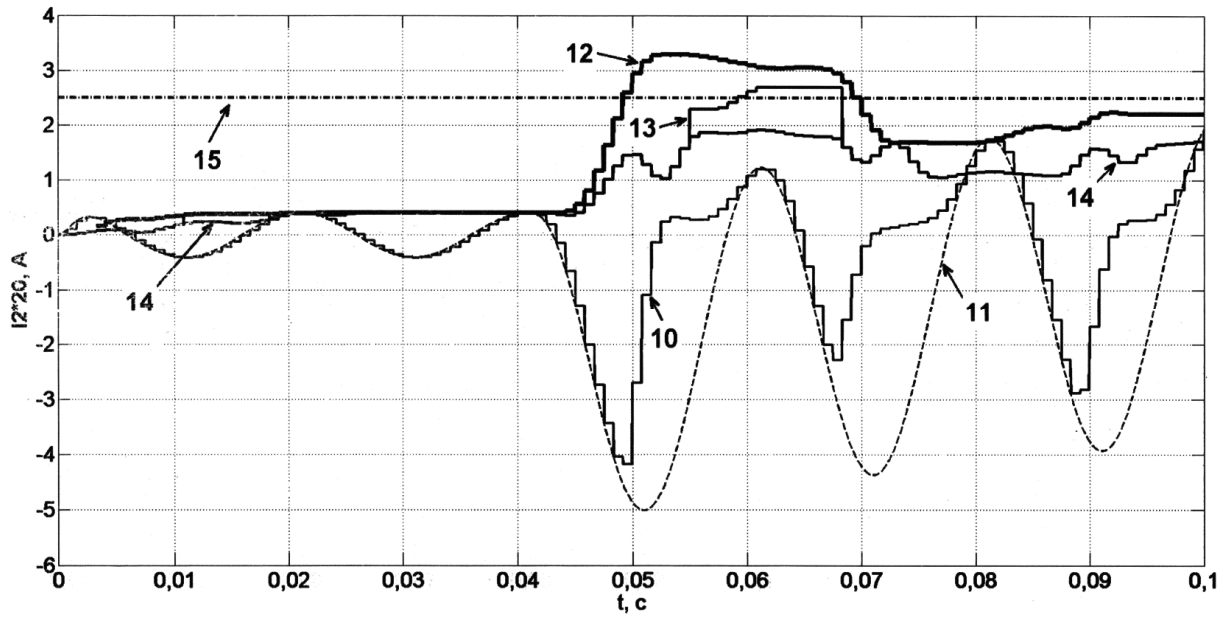
Как видно из фиг. 3, при одинаковой для обоих устройств уставке срабатывания 15 быстродействие измерительного органа тока в условиях глубокого насыщения трансформатора тока как минимум на 0,5 периода промышленной частоты выше, чем у его прототипа.

Источники информации:

1. Патент BY 2129, МПК Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20, 1998.
2. Патент US 6,757,146 В2, МПК Н 02Н 3/00, 2004.
3. Романюк Ф.А., Новаш И.В., Румянцев В.Ю., Румянцев Ю.В. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей. В кн. Перспективные материалы и технологии: монография. В 2т. Т. 1 / Под ред. В.В.Клубовича. – Витебск: УО "ВГТУ", 215. - С. 115-139.



Фиг. 2



Фиг. 3