

Авторы:

Ульянов Д.Н.^{1,2},
д.т.н. Мокеев А.В.^{1,2},
Пискунов С.А.^{1,2},
Андреев П.И.^{1,2},

¹Северный
(Арктический)
федеральный универси-
тет им. М.В. Ломоносова
(САФУ),

²ООО «Инженерный
центр «Энергосервис»,
г. Архангельск, Россия.

Ulyanov D.N.^{1,2},
D.Sc. Mokeev A.V.^{1,2},
Piskunov S.A.^{1,2},
Andreev P.I.^{1,2},

¹Northern (Arctic) Federal
University,

²Engineering Center
«Energoservice» LLC,
Arkhangelsk, Russia.

ЦИФРОВЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С ПОДДЕРЖКОЙ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

DIGITAL COMBINED CURRENT AND VOLTAGE TRANSFORMERS WITH SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS

Дата поступления рукописи в редакцию: 25.08.2025

Дата принятия рукописи в печать: 12.09.2025

Аннотация: в статье рассмотрены преимущества применения в электрических сетях среднего напряжения цифровых комбинированных измерительных трансформаторов на базе катушки Роговского и емкостного делителя напряжения. Применение катушки Роговского позволит значительно повысить точность измерений синхровекторов тока в широком диапазоне изменения тока благодаря отсутствию насыщения и остаточной намагниченности, характерных для электромагнитных трансформаторов тока. Для повышения точности и быстродействия оценки синхровектора тока предлагается использовать частотные фильтры с комплексной импульсной функцией. Применение цифровых измерительных трансформаторов совместно с усовершенствованными алгоритмами дистанционной и дифференциальной защиты на основе применения синхронизированных векторных измерений позволит повысить основные характеристики указанных защит, в том числе быстродействие, точность, чувствительность. Результаты исследований подтверждены лабораторными испытаниями опытных образцов устройств релейной защиты и опытом эксплуатации цифровых комбинированных измерительных трансформаторов.

Ключевые слова: цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения, катушка Роговского, синхронизированные векторные измерения, синхровекторы тока и напряжения, частотные фильтры с комплексной импульсной функцией, дистанционная защита, дифференциальная защита.

Abstract: this paper discusses the advantages of digital combined instrument transformers based on a Rogowski coil and a capacitive voltage divider in medium-voltage electrical networks. The Rogowski coil significantly improves the accuracy of current synchrophasor measurements over a wide range due to the absence of saturation and residual magnetization, which are typical for

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) является ее интеграция с технологией высокоавтоматизированных подстанций для реализации локальных, распределенных и централизованных систем защиты и автоматики понизительных подстанций и распределительных сетей [1-2].

Использование СВИ повышает точность и быстродействие оценки параметров сети в условиях электромеханических и электромагнитных переходных процессов [3]. Это позволяет разработать эффективные алгоритмы дистанционных и дифференциальных защит линий и трансформаторов [4-6].

Эффективность указанных алгоритмов релейной защиты (РЗ) повышается при использовании цифровых измерительных трансформаторов тока, обеспечивающих высокую точность преобразования тока и напряжения в цифровой код в широком динамическом диапазоне с последующим измерением синхровекторов.

Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения

Цифровые комбинированные измерительные трансформаторы тока и напряжения (ЦКТН) ЕСІТ-1 и ЕСІТ-2 (Госреестр СИ 94207-24) разрабатывались прежде всего для совместной работы с устройствами РЗ и многофункциональными измерительными

ми устройствами в составе цифровых ячеек среднего напряжения 6–35 кВ с воздушной изоляцией типа КРУ и КСО. С 2024 г. ООО «Инженерный центр «Энергосервис» приступил к разработке цифровых измерительных трансформаторов ЕСИТ-3 для применения в составе КРУ среднего напряжения с элегазовой изоляцией напряжением до 35 кВ (рис. 1).

При разработке ЦКТТН использовался опыт, приобретенный специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» в ходе разработки преобразователей аналоговых сигналов [7], в том числе встроенных в комбинированные трансформаторы тока и напряжения фирм Altea и Оптиметрик [8], а также опыт модернизации многофункциональных измерительных устройств ESM для работы совместно с первичными измерительными преобразователями тока и напряжения концерна ABB [9].

ЕСИТ содержит первичный преобразователь тока на основе катушки Роговского, первичный измерительный преобразователь напряжения на основе емкостного делителя напряжения и встроенный преобразователь аналоговых сигналов. Преимущества использования катушки Роговского связаны с отсутствием насыщения и остаточной намагниченности, наличием большого динамического диапазона измерения тока с высокой точностью [10]. Для целей измерений и защиты используется одна катушка Роговского, но преобразование в цифровой код производится с помощью двух разных каналов АЦП.

В ЕСИТ производится измерение и передача наряду с потоками оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений потоков синхровекторов. Встроенные в ЕСИТ системы измерений и РЗ на основе СВИ позволяют реализовать новую архитектуру систем автоматизации для распределительных устройств среднего напряжения, в том числе централизованные и распределен-



Рис. 1. ЦКТТН для цифровых ячеек с воздушной изоляцией ЕСИТ-1, ЕСИТ-2 и для ячеек с элегазовой изоляцией ЕСИТ-3

ные системы релейной защиты и автоматики (РЗА) [7].

Специфика первичного измерительного преобразователя тока на основе катушки Роговского связана с тем, что выходной сигнал пропорционален производной тока. Поэтому необходимо внести изменения в алгоритмы обработки сигналов для оценки синхровекторов тока.

Наиболее распространенный подход связан с использованием так называемых аналоговых «интеграторов», которые чаще всего реализуются с помощью фильтров низких частот первого порядка. Основные недостатки такого решения связаны с появлением амплитудных и фазовых погрешностей и наличием длительного переходного процесса, например, при исчезновении и возобновлении питания аналоговой электронной части первичного измерительного преобразователя тока.

Поэтому представляется целесообразным перейти на цифровую обработку сигналов от катушек Роговского. Подобное решение при использовании пассивных катушек Роговского используется в устройствах РЗ концерна ABB и многофункциональных устройствах ESM [9]. В нашем же случае применения указанную обработку целесообразно производить непосредственно в цифровых трансформаторах.

В статье рассматриваются решения для РЗ, когда за счет применения специальных алгоритмов цифровой обработки сигналов отсутствует дополнительная погрешность обработки сигналов и нет потери в быстродействии.

Разработка алгоритмов обработки сигналов

Как указывалось выше, специфика первичного измерительного преобразователя тока на основе катушки Роговского связана с тем, что его выходной сигнал пропорционален производной тока. Поэтому необходимо внести изменения в алгоритмы обработки сигналов для оценки синхровекторов тока.

Упрощенная структурная схема обработки сигналов в ЕСИТ для измерения синхровектора тока представлена на рис. 2. Схема представлена для аналоговой системы-прототипа обработки сигналов в ЕСИТ. Структурная схема алгоритма измерения синхровектора тока близка к классической

electromagnetic current transformers. This study considers frequency filters with a complex impulse response to improve the speed and accuracy of current synchrophasor estimation. Digital instrument transformers and advanced algorithms for distance and differential protection based on synchrophasor technology improve the main protection characteristics, such as speed, accuracy, and sensitivity. The study results were confirmed by mathematical modeling, laboratory tests of protection device prototypes, and experience in operating digital combined instrument transformers.

Keywords: digital instrument transformers, Rogowski coil, synchrophasor measurements, current and voltage synchrophasors, filters with complex impulse response, distance protection, differential protection.



Ульянов
Дмитрий Николаевич

В 1998 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электро-снабжение». Аспирант САФУ, направление подготовки «Электротехнические системы и комплексы». Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Мокеев
Алексей Владимирович

В 1981 г. окончил Ленинградский политехнический институт (в настоящее время СПбГПУ), инженер-электрик, специализация «Релейная защита и автоматизация энергосистем». В 2011 г. в СПбГПУ защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и алгоритмы обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем различного функционального назначения». Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Профессор кафедры электроэнергетики и электротехники САФУ.

для устройств с поддержкой СВИ. Выполняются две основных операции: смещение спектра сигнала и его фильтрация с помощью усредняющего КИХ-фильтра. Последний в основном и определяет статические и динамические характеристики оценки синхровектора.

Основное изменение, внесенное в обработку сигнала, связано с использованием усредняющего КИХ-фильтра с комплексной импульсной функцией, что позволяет получить наилучшие решения по точности и быстродействию при оценке синхровектора тока.

Вследствие использования операции дифференцирования полезный сигнал (синхровектор тока) при изменении частоты в энергосистеме 45-55 Гц изменяется от 0,9 до 1,1. С учетом операции смещения спектра сигнала для уменьшения погрешности необходимо, чтобы КИХ-фильтр имел амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) обратную дифференцирующему звену в области частот от -5 до +5 Гц, т.е. коэффициент усиления фильтра на частоте -5 Гц (соответствует 45 Гц) должен быть 1,111, на нулевой частоте 1 (50 Гц), а на частоте 5 Гц (55 Гц) 0,909. Но для обычных КИХ-фильтров это невозможно, так как АЧХ симметрична относительно нулевой частоты. Одно из возможных решений по снижению погрешности связано с ее компенсацией за счет предварительной оценки мгновенной частоты. Данный способ подробно изложен в работах авторов [11, 12] и поэтому в настоящей статье не рассматривается. Предлагается применение КИХ-фильтров с комплексной импульсной функцией, у которых АЧХ в общем случае асимметрична относительно нулевой частоты.

При синтезе усредняющих КИХ-фильтров необходимо учитывать, что так как у катушки Роговского выходной сигнал практически пропорционален производной тока, то при этом хорошо подавляют аperiodические составляющие с малым коэффициентом затухания. Но в распре-

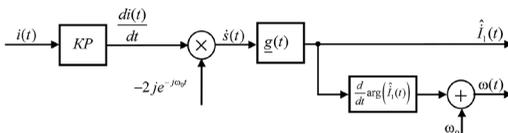


Рис. 2. Структурная схема алгоритма обработки сигнала.
KP – катушка Роговского, оценка синхровектора тока $\hat{i}_i(t)$, $g(t)$ – комплексная импульсная функция фильтра, $\omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$

делительных сетях, особенно в кабельных сетях, значение коэффициента затухания может составлять несколько сотен и даже несколько тысяч. При $\beta > 0,5\omega_0$ аperiodические составляющие будут усиливаться. Также при выборе или синтезе фильтров необходимо учитывать, что в катушке Роговского происходит усиление высших гармоник пропорционально их частоте.

В статье рассматривается два способа синтеза КИХ-фильтров с комплексной импульсной функцией:

1) на основе специального частотного преобразования для известных решений, разработанных в случае применения электромагнитных трансформаторов тока;

2) прямой синтез КИХ-фильтров с комплексной импульсной функцией.

Рассмотрим первый случай. Для получения математического описания фильтра с комплексной импульсной функцией необходимо умножить передаточную функцию исходного фильтра $K(p)$ на выражение обратное передаточной функции катушки Роговского с учетом смещения спектра

$$\underline{K}(p) = K(p) \frac{\omega_0}{p + j\omega_0}.$$

Следует отметить, что данный способ обеспечивает устойчивые решения только для фильтров с нулем передачи на частоте ω_0 .

Рассмотрим применение предложенного частотного преобразования. На рис. 3а приведены соответственно импульсные характеристики и АЧХ для ряда фильтров. При этом первые два фильтра с прямоугольной формой импульсных характеристик длительностью 10 мс (кривая 1) и 20 мс (кривая 2) широко применяются в устройствах РЗ [13], а третий фильтр (кривая 3) рекомендован для реализации УСВИ класса Р [14]. Последний фильтр можно рассматривать как последовательное соединение двух фильтров с прямоугольной формой импульсной характеристики длительностью по 20 мс. Оперирова фильтрами 1 и 2, можно получить фильтр с трапециевидальной формой характеристики (кривая 4) и характеристикой близкой к колоколообразному виду (кривая 5).

Произведем анализ указанных фильтров для случая, когда в токе имеется составляющая промышленной частоты и аperiodическая составляющая. После операции смещения спектра сигнала от первой составляющей формируется низкоча-

стотный полезный сигнал (синхровектор) и подлежащая подавлению составляющая с удвоенной отрицательной частотой. Аперриодическая составляющая преобразуется в затухающую колебательную составляющую с комплексной частотой $-\beta - j\omega_0$.

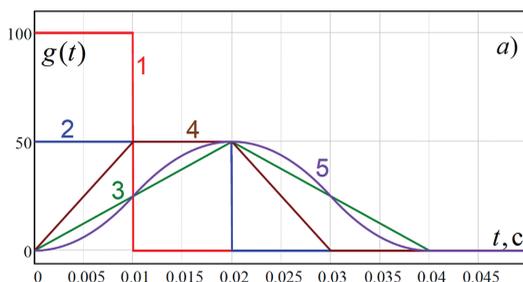
Анализ прохождения через фильтр первых двух компонент может быть произведен с помощью обычных АЧХ, а третьей – при использовании расширенных спектральных представлений фильтров в сечении $-\beta - j\omega_0$ [11, 12]. Полезная компонента при девиации частоты в энергосистеме ± 5 Гц уменьшается фильтрами по-разному (более 3% для фильтра 3). Вторая компонента плохо подавляется фильтрами 1 и 2 (погрешность более 5%).

Быстродействие фильтра и в целом алгоритма обработки сигналов при условии подавления составляющей двойной частоты и затухающей колебательной составляющей определяется длительностью импульсной характеристики фильтра. Иначе быстродействие будет определяться длительностью затухания ослабленной фильтром затухающей колебательной составляющей до уровня, определяемого заданной точностью измерений. При этом только фильтры 3 и 5 обеспечивают подавление любых аперриодических составляющих к моменту завершения собственного переходного процесса.

Для оценки быстродействия фильтра выведено выражение в зависимости от значения коэффициента затухания аперриодической составляющей с учетом влияния других составляющих погрешности

$$t_{\beta}(\beta) = -\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\varepsilon_{\text{доп}} - \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{|K(-\beta + j\omega_0)|} \right),$$

где ε_1 – погрешность в обработке полезной компоненты сигнала (синхровектора тока),
 ε_2 – погрешность подавления составляющей двойной частоты,
 $\varepsilon_{\text{доп}}$ – допустимая полная погрешность.



На рис. 3б приведены графики быстродействия фильтров при $\varepsilon_{\text{доп}} = 0,1$ (10%). Следует отметить, что из-за того, что вторая и третья компонента входного сигнала фильтра являются функциями времени, представленное выше выражение может давать чуть завышенную оценку быстродействия фильтра.

На основании рис. 3б можно сделать следующие выводы. Фильтр 1 обеспечивает наилучшие результаты по быстродействию, если $\beta \geq 150 \text{ c}^{-1}$. Наилучшими результатами в случае, если β изменяется в очень широких пределах обладают фильтры 3, 4, 5. Один из наиболее популярных в РЗА фильтров 2 при $\beta \geq 14 \text{ c}^{-1}$ имеет быстродействие около 80 мс. Следует отметить, что все рассмотренные фильтры не смогут обеспечить точность оценки синхровектора лучше 10%, за исключением применения коррекции по частоте для фильтров 3, 4 и 5 [11, 12].

Рассмотрим переход от фильтров, которые используются в случае применения электромагнитных трансформаторов тока, к фильтрам при использовании катушки Роговского. На рис. 4 представлены результаты преобразований фильтров с треугольной и трапециевидальной формой импульсной характеристики. При этом вещественная и мнимая части получаемой комплексной импульсной характеристики обозначены соответственно синим и зеленым цветом.

АЧХ полученного фильтра надо рассматривать как в положительной, так и в отрицательной области частот (рис. 5), т.к. она ассиметрична области абсцисс (кривая 1). На рис. 5 приведена так же смещенная АЧХ катушки Роговского (кривая 2), АЧХ исходного фильтра (кривая 3) с трапециевидальной импульсной функцией и АЧХ результирующего фильтра (кривая 4), представляющая собой произведение АЧХ катушки Роговского с учетом операции смещения и АЧХ синтезированного фильтра.

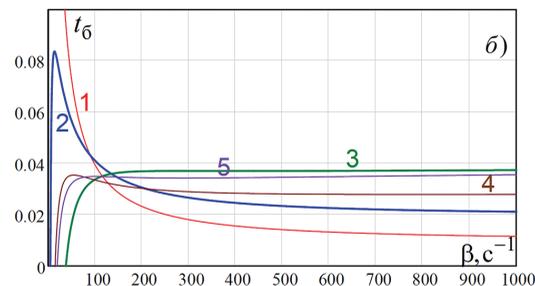


Рис. 3. Импульсные функции (а) и быстродействие фильтров при заданной допустимой погрешности (б)



Пискунов

Сергей Александрович

В 2016 г. окончил САФУ, по специальности «Электроэнергетика и электротехника».

Инженер группы комплексного проектирования ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Андреев

Павел Игоревич

В 2017 г. окончил САФУ, по специальности «Мехатроника и робототехника».

Инженер-программист ООО «Инженерный центр «Энергосервис».

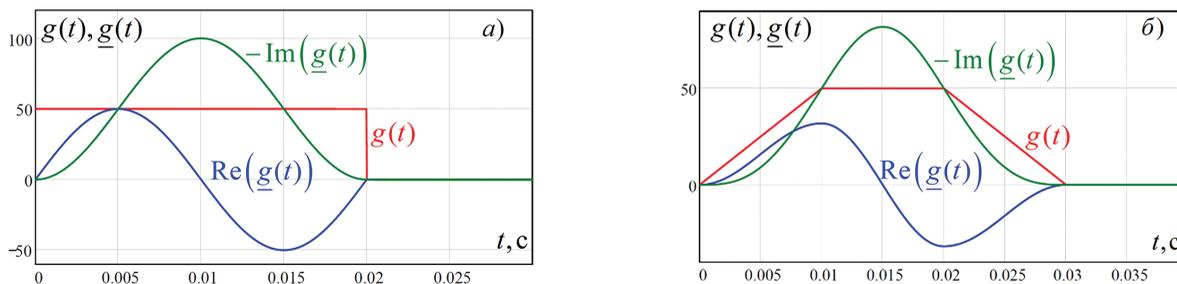


Рис. 4. Импульсные функции фильтров

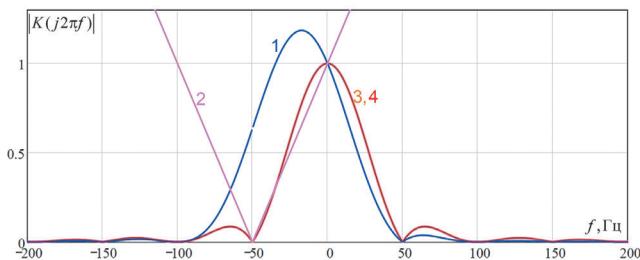


Рис. 5. АЧХ фильтров: синтезированного фильтра (1), смещенная для катушки Роговского (2), исходного фильтра (3), результирующая (4)

Из представленных графиков можно сделать вывод, что в итоге при применении катушки Роговского с синтезированными фильтрами получим тот же результат, как и в случае идеализированного трансформатора тока с исходными фильтрами, без потерь по быстродействию и точности.

Результаты по быстродействию и точности можно улучшить, если производить синтез фильтров с помощью разработанного метода анализа линейных систем на основе расширенных спектральных представлений и методов нелинейной оптимизации с ограничениями [11, 12, 15].

На рис. 6 представлены импульсные характеристики усредняющих КИХ-фильтров, синтезированные при различных требованиях по быстродействию, точности, диапазону изменения коэффициента затухания аperiodической составляющей. Для всех случаев принят диапазон изменения частоты в энергосистеме ± 5 Гц.

Большинство фильтров было синтезировано для использования в устройствах РЗ распределительных

сетей. Фильтр 2 обеспечивает оценку синхровектора тока с точностью до 2% в заданном диапазоне изменения коэффициента затухания и обеспечивает измерения мгновенной частоты. Использование фильтра 5 позволит выполнить оценку синхровектора с точностью выше 1% за счет предварительной оценки частоты и коррекции погрешности оценки синхровектора тока. Повышение точности оценки синхровектора тока важно для повышения чувствительности и селективности устройств РЗ, так как цифровой трансформатор ЕСІТ обеспечивает высокую точность преобразования тока (до 0,5%).

На рис. 6б представлены характеристики по быстродействию при допустимой погрешности 10%. Из представленных фильтров большая их часть может быть использована для 1 ступеней токовых защит. При синтезе фильтров необходимо учитывать, что коэффициент затухания аperiodической составляющей может значительно изменяться в зависимости от места короткого замыкания (КЗ). Прежде всего необходимо обеспечить максимальную чувствительность и быстродействие защиты в конце зоны действия.

Для синтезируемых фильтров так же, как и для фильтра 1 рис. 3, выполнение частотных преобразований с целью получения комплексных импульсных функций для применения указанных фильтров совместно с катушкой Роговского не приводит к устойчивому решению. Необходимы дополнительные преобразования, которые уже не обеспечат полной идентичности результатов. Поэтому наилучшим решением является прямой синтез фильтров с комплексными импульсными функциями.

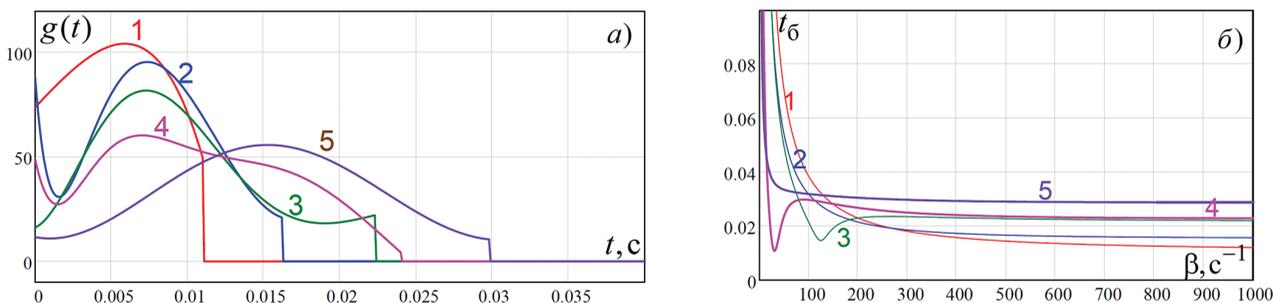


Рис. 6. Импульсные функции (а) и быстродействие при допустимой погрешности 10% (б)

Как отмечалось ранее, синтез фильтра должен производиться исходя из конкретных требований к защите. Синтезируемые фильтры представляют собой последовательное, параллельное или смешанное соединение трех простых КИХ-фильтров, импульсные функции которых описываются финитной комплексной затухающей составляющей

$$\underline{g}(t) = \dot{G}e^{pt} - \dot{G}e^{pT} e^{-p(t-T)},$$

где $p = -\alpha + j\omega$, T – длительность импульсной характеристики.

На рис. 7а и рис. 8а приведены графики вещественной и мнимой составляющих комплексной импульсной функции синтезируемых фильтров соответственно при параллельном и смешанном соединении фильтров. На рис. 7б и рис. 8б представлены графики оценки быстродействия синтезированных фильтров (кривая 1) по сравнению с ранее рассмотренными фильтрами, полученными из фильтра с прямоугольной импульсной функцией (кривая 2) и треугольной импульсной функцией (кривая 3) при допустимой погрешности 10% и при 5% погрешности для синтезированного фильтра (кривая 4 рис. 8б).

Сравнивая полученные результаты с усредняющим КИХ-фильтром 4 (рис. 6), разработанным для использования с электромагнитными измерительными трансформаторами тока, можно сделать вывод, что синтезируемые фильтры с комплексной импульсной характеристикой в случае использования первичного измерительного преобразователя на основе катушки Роговского обеспечивают близкие статические и динамические характеристики по оценке синхровектора тока.

За счет применения синтезированного фильтра будет обеспечиваться оценка синхровектора с заданной точностью при максимальном отклонении частоты и при любом значении коэффициента затухания аperiodической составляющей. В большинстве практических случаев имеет место ограниченный диапазон ее изменения. Кроме того, для токовых защит необходимо прежде всего обеспечить наилучшую чувствительность в конце защищаемой зоны. Это позволяет существенно снизить требования по диапазону изменения аperiodической составляющей и повысить быстродействие фильтра.

Важно отметить, что разработанные авторами алгоритмы дистанционной защиты [3-5] обеспечивают быструю и точную оценку комплексного сопротивления в условиях переходных процессов, в том числе при переходных процессах в частотных фильтрах устройства защиты. Таким образом, оценка комплексного сопротивления производится намного быстрее, чем оценка синхровектора тока или синхровектора напряжения. При этом важно использовать фильтры в измерительных каналах тока и напряжения с одинаковыми суммарными частотными характеристиками.

Целесообразно применение усредняющих КИХ-фильтров с комплексными импульсными функциями и для случаев использования других первичных преобразователей тока, в том числе электромагнитных трансформаторов тока. Например, в тех случаях, когда диапазоны отклонения частоты энергосистемы выше и ниже номинального значения отличаются. Традиционно в РЗ принято считать диапазоны одинаковыми и равными ± 5 Гц. Но если ориентироваться не на оценку частоты

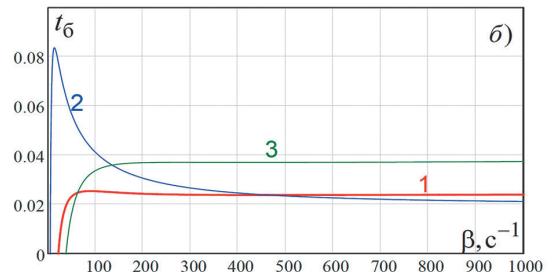
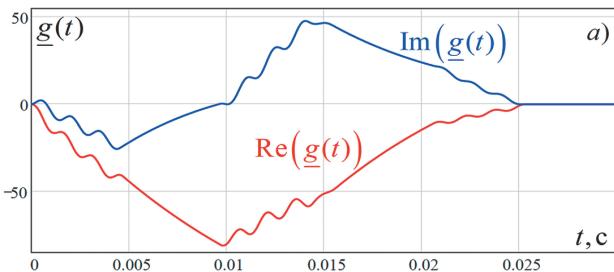


Рис. 7. Вещественная и мнимая составляющая импульсной функции фильтра (а) и быстродействие (б). Параллельное соединение фильтров

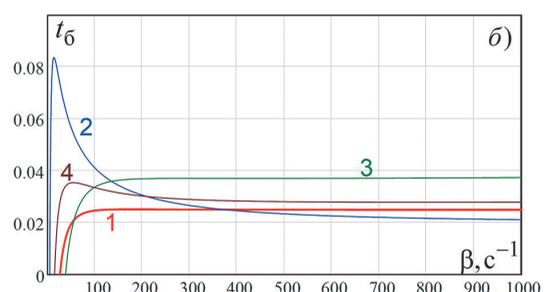
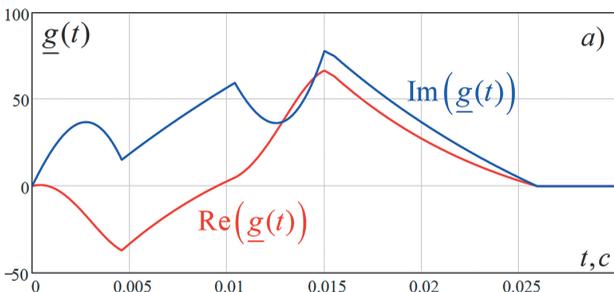


Рис. 8. Вещественная и мнимая составляющая импульсной функции фильтра (а), быстродействие (б). Последовательное соединение фильтров.

в энергосистеме, производимую устройствами телемеханики с большим временем усреднения, а на мгновенную частоту, то указанные диапазоны изменения частоты значительно шире. Так на основе исследования относительно небольшого количества осциллограмм аварий и данных устройств синхронизированных векторных измерений зафиксировано изменение мгновенной частоты в диапазоне от 41,5 до 56,5 Гц.

Представленные выше примеры синтеза усредняющих КИХ-фильтров приведены для аналоговой системы-прототипа для того, чтобы показать предельные характеристики по точности и быстродействию. Для практической реализации лучше производить непосредственно синтез цифрового фильтра при заданных значениях частоты дискретизации [16].

Во многих случаях достаточно использования информации о синхровекторах тока и напряжения. Но иногда, например, для защиты от однофазных замыканий на землю, целесообразно использовать информацию об эквивалентных синхровекторах высших гармоник токов и напряжений нулевой последовательности [17]. Для систем управления в ряде случаев дополнительно необходимо измерять эквивалентные синхровекторы тока и напряжения с учетом влияния высших гармоник, для измерения качества электроэнергии необходимо измерять синхровекторы высших гармоник [18]. При использовании катушки Роговского для оценки синхровекторов тока также более целесообразно использовать цифровую обработку сигналов.

Преимущества ЦКТТН для РЗ

Цифровые комбинированные измерительные трансформаторы ЕСИТ сертифицированы с заявленными классами точности для РЗ по току 5PR и напряжению 3P, хотя реальные характеристики соответствуют классу точности 0,5 [19], как и для измерений. Поэтому наряду с отсутствием остаточной намагниченности и насыщения повышение точности дает дополнительный эффект в случае реализации разработанных авторами алгоритмов дистанционной защиты линии [4, 5].

В статье рассматриваются преимущества применения ЦКТТН с поддержкой СВИ для реализации защиты силового трансформатора. Наиболее распространенной основной защитой силового трансформатора является дифференциальная защита. Расчет уставок дифференциальной защиты трансформатора основывается на отстройке от тока небаланса, который зависит от допустимой погрешности, однотипности и схемы подключения трансформаторов тока, регулирования напряжения трансформатора, расчетной величины броска тока намагничивания (БТН).

Современные микропроцессорные дифференциальные защиты позволяют значительно снизить уставку по дифференциальному току и реагировать на развитие некоторых сложных типов повреждений трансформато-

ра. Тем не менее, такая защита требует качественной отстройки от БТН во избежание ложных срабатываний при включении силового трансформатора.

В настоящее время широко распространенным подходом является использование блокировки данной защиты при БТН по уровню второй гармоники в токе трансформатора [20]. В то же время наличие значительной апериодической составляющей в токе КЗ приводит к увеличению насыщения электромагнитных трансформаторов и, следовательно, к повышению уровня второй гармонической составляющей в токе трансформатора и существенному замедлению защиты при внутренних повреждениях [6].

Рассмотрим, какие преимущества дает применение цифровых трансформаторов тока с поддержкой СВИ в плане совершенствования защиты трансформатора.

Во-первых, измерение синхровекторов тока трансформатора в совокупности с применением цифровых трансформаторов тока без насыщения позволяет значительно снизить расчетную величину тока небаланса дифференциальной защиты за счет фильтрации апериодической составляющей, их малой погрешности, возможности контроля положения РПН/ПБВ по данным СВИ. Это позволяет более чем на порядок снизить расчетную величину тока небаланса [6].

Во-вторых, измерение синхровекторов тока трансформатора позволяет решить ряд вопросов, связанных с отстройкой дифференциальной защиты трансформатора от режима БТН при включении на нагрузку и при внешних КЗ, поскольку наличие измерений угла между синхровекторами тока однозначно определяет направление мощности в обмотках трансформатора. Как показали исследования, при внутренних повреждениях трансформатора, точная оценка угла между синхровекторами тока может быть получена за значительно меньшее время, чем оценка дифференциального тока [6].

На рис. 9 приведены результаты моделирования в пакете Matlab для реального силового трансформатора 35/6 кВ мощностью 10 МВА. Показаны графики изменения относительного значения модуля синхровектора дифференциального тока в случае использования установленных на подстанции электромагнитных транс-

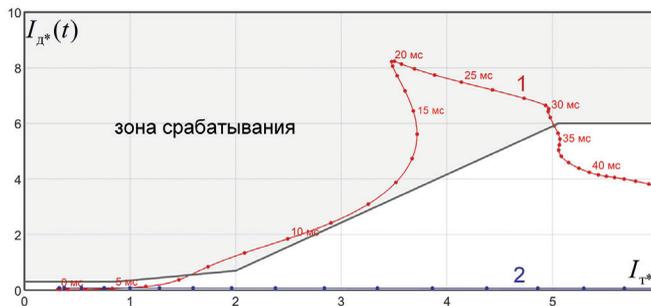


Рис. 9. Функционирование дифференциальной защиты трансформатора при внешнем КЗ

форматоров тока (кривая 1) и цифровых трансформаторов тока (кривая 2) при КЗ на шинах 6 кВ. Как следует из графика 1 рис. 9, в случае использования электромагнитных трансформаторов тока необходимо предпринять дополнительные меры для предотвращения ложной работы дифференциальной защиты трансформатора при внешних КЗ.

Для повышения точности и быстродействия дифференциальной защиты предлагается в основу ее алгоритмов заложить следующие выражения для оценки модуля и фазы дифференциального тока трансформатора:

$$I_{д}(t) = \left| \dot{I}_1(t) + k\dot{I}'_1(t) - k_T^{-1}(\dot{I}_2(t) + k\dot{I}'_2(t)) \right|,$$

$$\varphi_{д}(t) = \arg \left(\frac{\dot{I}_1(t) + k\dot{I}'_1(t)}{\dot{I}_2(t) + k\dot{I}'_2(t)} \right), \quad (1)$$

где $k = L_{12} / z_{12}$ – комплексный коэффициент, характеризующий удельные параметры обмоток трансформатора.

На рис. 10 представлены графики функционирования дифференциальной защиты при внутреннем КЗ в трансформаторе при использовании алгоритмов на основе выражений (1) в случае использования установленных на подстанции электромагнитных трансформаторов тока (кривая 1) и цифровых трансформаторов тока (кривая 2).

Как следует из представленных графиков, дифференциальная защита на основе контроля модуля и аргумента синхровектора дифференциального тока на основе зависимостей (1) обеспечивает высокое быстродействие защиты как при использовании электромагнитных трансформаторов тока (кривая 1), так и при использовании цифровых измерительных трансформаторов тока на основе катушки Роговского (кривая 2).

При использовании технологии СВИ наряду с дифференциальным принципом выполнения защиты трансформатора перспективно применения дистанционного принципа выполнения защиты. При этом за счет

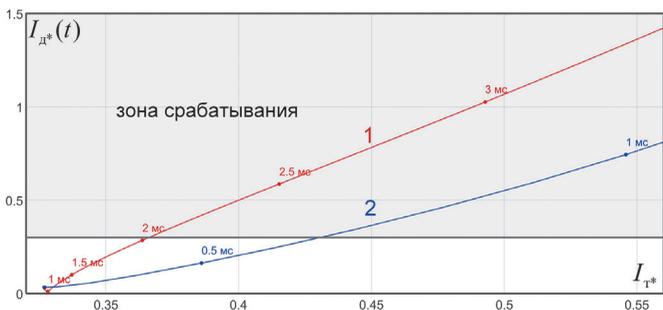


Рис. 10. Функционирование дифференциальной защиты трансформатора при внутреннем КЗ

оценки индуктивности намагничивания обеспечивается эффективная отстройка от БТН [6].

Для силового трансформатора справедливыми оказываются и те преимущества, которые предоставляют двухсторонние измерения синхровекторов для дистанционной защиты линии [5, 6]. Также стоит отметить подход, при котором используется не отдельная оценка комплексных сопротивлений петли КЗ $z_{12}(t)$ или $z_{21}(t)$, а их разность, что позволяет по аналогии с дифференциальной защитой производить расчет некоторого сопротивления небаланса $z_{нб}$ и сравнивать его с заданной уставкой $z_{сз}$. В этом случае могут сочетаться преимущества дистанционного и дифференциального принципа защиты трансформатора.

Применение ЦКТТН

Особенностью ЕСИТ является возможность формирования наряду с потоками оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений потоков синхровекторов. Встроенные в ЕСИТ системы измерений и РЗ на основе СВИ позволяют реализовать новую архитектуру систем автоматизации для распределительных устройств среднего напряжения, в том числе централизованные и распределенные системы РЗА [7].

ЕСИТ может быть подключен к шине процесса подстанции или непосредственно к устройству РЗА и многофункциональному измерительному устройству ESM, установленному в той же ячейке КРУ (КСО) (рис. 11). В цифровом измерительном трансформаторе ЕСИТ реализованы функции простейших токовых защит и имеется релейный контакт для отключения высоковольтного выключателя [19].

Цифровой измерительный трансформатор ЕСИТ ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан специально для реализации цифровых ячеек для оснащения закрытых электроустановок среднего напряжения 6-35 кВ и входит в состав программно-технического комплекса (ПТК) ES GEAR. ПТК ES GEAR представляет собой совокупность интеллектуальных устройств, реа-

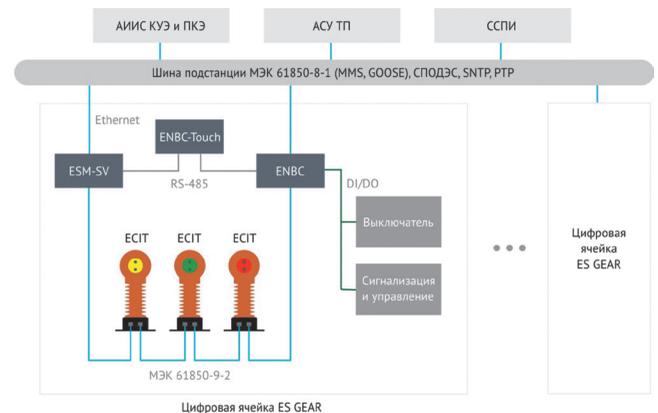


Рис. 11. Структурная схема цифровой ячейки ПТК ES GEAR

лизирующих функции РЗ, автоматики, измерения и управления ячейкой 6-35 кВ. Взаимодействие устройств, входящих в ES GEAR, осуществляется по цифровым интерфейсам, основной из которых – Ethernet 100Base-TX.

Цифровые связи, построенные на основе IEC 61850 между устройствами внутри конкретной ячейки и другими ячейками одного распределительного устройства, позволяют минимизировать количество клемм и проводов, упростить монтаж, ускорить тестирование ячейки и ввод в работу подстанции. Важным преимуществом для эксплуатации является непрерывная самодиагностика компонентов ПТК, направленная на повышение надежности и снижение затрат на наладку и обслуживание.

В состав ПТК ES GEAR входят (рис. 11):

- ECIT – однофазные комбинированные измерительные трансформаторы с цифровыми интерфейсами для передачи измерений в цифровом виде;
- ENBC – устройство РЗА, контроллер присоединений;
- ESM-SV – многофункциональный измерительный преобразователь телемеханики, цифровой счетчик электроэнергии и прибор контроля параметров качества электроэнергии;
- ЭНКС-2 – блок коррекции времени для синхронизации устройств ES GEAR;
- ENBC Touch – сенсорная панель управления ячейкой;
- AFS – оптический датчик дуговой защиты с CAN-интерфейсом.

Устройство РЗА ENBC функционирует на основе получаемых в режиме реального времени измерений тока и напряжения от цифровых измерительных трансформаторов ECIT по протоколу IEC 61850-9-2 в виде потоков синхронизированных векторных измерений (SP-потоки). Поток SP публикуется для целей защиты и автоматики, и позволяет снизить объем передаваемых данных с одновременным повышением быстродействия защит. Измеренные мгновенные значения (SV – Sampled Measured Values) тока и напряжения в виде потоков поступают в ESM-SV для измерения параметров режима сети, регистрации параметров качества электроэнергии, а также для учета электроэнергии.

Ячейки ES GEAR подключены к шине станции с применением параллельного бесшовного резервирования согласно IEC 62436-3 (PRP). ESM-SV объединяются либо аналогичным образом по PRP, либо по RSTP. Синхронизация времени в устройствах ESM-SV и ENBC осуществляется по протоколам SNTP.

В рамках реконструкции РТП 10 кВ в городе Санкт-Петербург ООО «Инженерный центр «Энергосервис» совместно с ООО «ЦЭСИС» в 2024 г. ввели в опытную эксплуатацию две вводные цифровые ячейки типа КСО-208. Включенные в работу ячейки КСО-208 были собраны на базе ПТК ES GEAR и являются примером функционирова-

ния РЗА на новых принципах с применением технологий СВИ и высокоавтоматизированных подстанций.

В составе цифровой ячейки КСО-208 были впервые введены в работу под нагрузкой цифровые комбинированные измерительные трансформаторы ECIT и устройства РЗА ENBC с применением технологии СВИ.

ENBC на вводной ячейке согласно проекту реконструкции РТП 10 кВ выполняет следующие функции:

- токовую ступенчатую защиту от междуфазных КЗ;
- токовую защиту нулевой последовательности от замыканий на землю;
- защиту минимального и максимального напряжения;
- токовую направленную защиту;
- резервирование при отказе выключателя с поддержкой GOOSE-сообщений;
- отключение от внешних устройств РЗА с поддержкой GOOSE-сообщений;
- логическую защиту шин с поддержкой GOOSE-сообщений;
- защиту от дуговых замыканий с применением выносного оптического CAN-датчика дуги;
- регистрацию аварийных осциллограмм;
- регистрацию аварийных событий (журналы аварий);
- автоматическое управление выключателем;
- автоматическое включение резерва с применением GOOSE-сообщений;
- восстановление нормального режима с применением GOOSE-сообщений.

На первом объекте внедрения ПТК ES GEAR реализованы простейшие токовые защиты. На следующих объектах планируется реализация дифференциальных и дистанционных защит при использовании СВИ.

Наибольший эффект применения ECIT предполагается в проектах, в которых цифровые измерительные трансформаторы будут установлены на всех присоединениях распределительного устройства среднего напряжения. В этом случае предполагается реализация распределенных и централизованных систем РЗ на основе использования синхровекторов токов и напряжений.

Выводы

Показана перспективность применения цифровых комбинированных измерительных трансформаторов с поддержкой технологии СВИ для совершенствования РЗ электрических сетей среднего напряжения. Использование в качестве первичного измерительного преобразователя тока катушки Роговского наряду с усовершенствованными алгоритмами дистанционной и дифференциальной защиты линий и трансформаторов позволяет существенно повысить техническое совершенство устройств РЗ.

Для повышения качества обработки сигналов в случае использования катушки Роговского предлага-

но использование фильтров с комплексной импульсной функцией. Приведены примеры синтеза частотных фильтров для оценки синхровекторов тока.

Рассмотрен опыт применения цифровых комбинированных измерительных трансформаторов в составе ПТК ES GEAR для реализации цифровой ячейки.

Перспективы дальнейших исследований по теме статьи связаны с реализацией в пилотных проектах разработанных алгоритмов дистанционных и дифференциальных защит линий и трансформаторов на основе СВИ, а также с реализацией централизованных и распределенных систем защиты и автоматики.

Литература:

1. Ferrer H.J.A. et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. – Pullman: SEL, 2010. – 397 p.
2. Wide area protection & Control technologies. CIGRE, WG B5.14. – Paris: CIGRE. – 2016.
3. Мокеев А.В. Анализ синхровекторов переходных процессов в энергосистеме // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 1 (211). – С. 62-70.
4. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционной защиты // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 3 (48). – С. 12-17.
5. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 1 (54). – С. 8-15.
6. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Автоматизация понизительных подстанций на основе технологии синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 3 (56). – С. 10-18.
7. Ульянов Д.Н., Пискунов С.А., Мартынов А.Н., Мокеев А.В. Разработка и опыт внедрения устройств сопряжения с шиной процесса // Энергия единой сети. – 2024. – № 5-6 (75). – С. 42-50.

8. Мокеев А.В., Перельгин Л.В., Хромцов Е.И. Комбинированные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения 6-35 кВ // Новое в российской энергетике. – 2017. – № 1. – С. 39-52.
9. UniGear Digital. Engineering Guide. ABB. – 2020. – 118 p.
10. Practical aspects of Rogowski coil applications to relaying. IEEE PSRC Report. – 2010.
11. Mokeev A.V. Application of spectral representations in coordinates of complex frequency for the digital filter analysis and synthesis. In: Márquez FPG (ed.) Digital Filters. – Rijeka, InTech. – 2011. – pp. 27-52.
12. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.В. Мартынов, А.В. Мокеев [и др.]. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023 г. – 324 с.
13. Understanding microprocessor-based technology applied to relaying, Report of Working Group I16 of the Relaying Practices Subcommittee IEEE. – 2004.
14. IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements. – 2018.
15. Mokeev A.V. Filter synthesis for PMU // IEEE International Conference SIBCON-2017. – Astana, 2017. – pp.1-6.
16. Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС // Вестник казанского государственного энергетического университета, том 12. – № 3 (47). – С. 92-100.
17. Пискунов С.А., Мокеев А.В. Совершенствование релейной защиты электрических сетей среднего напряжения // Материалы 96-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко Выпуск 75. Надежность систем энергетики: устойчивое развитие и функционирование. – Архангельск. – 2024. – С. 578-587.
18. Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Многофункциональные интеллектуальные электронные устройства для цифровых подстанций // Энергетик. – 2023. – № 3. – С. 52-57.
19. Плакидин Р.С. и др. Применение датчиков тока на основе катушки Роговского для комбинированных измерительных трансформаторов с цифровым выходом // Релейщик. – № 2 (49). – 2024. – С. 10-14.
20. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

Новинка!

Учебное пособие

ПРОЦЕССЫ
В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ПРИ
МЕДЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ
НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

П.Л. Воронов, Д.С. Петров

ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ
ПРИ МЕДЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ
НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

Чебоксары / 2024

Заказ книги:

adv@srzau-ric.ru

+7 (905) 346-87-55

450 р.,

включая НДС и доставку