

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Денис Геннадьевич Григорьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. В развитии вторичных систем станций и подстанций, включающих релейную защиту, автоматику, управление, учет электроэнергии, в последнее время произошли качественные изменения, вызванные внедрением цифровых технологий. Внедрение цифровых технологий поддерживается программами инновационного развития, такими как, например, «Цифровая трансформация 2030». Суть внедрения цифровых технологий связана с применением цифровых каналов передачи данных по единым стандартам. Активно внедряются проекты цифровых подстанций с передачей цифровой информации на всех уровнях, начиная с первичного оборудования, включая передачу информации как от измерительных трансформаторов тока и напряжения, так и от коммутационных аппаратов. В настоящее время активно развиваются и начинают внедряться цифровые измерительные трансформаторы, в которых информация об измеренных токах и напряжениях представляется в цифровом коде. Новые подходы к измерениям первичных токов и напряжений и передаче информации ставят новые задачи и открывают перспективы усовершенствования методов обработки сигналов, применяемых для релейной защиты. В связи с этим актуальной задачей является разработка и исследование подходов к цифровой обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Материалы и методы. Для решения задач, поставленных в рамках данного исследования, использованы аналитические и численные методы решения с применением программных продуктов MathCAD и языка программирования Python для генерации сигналов и вывода их на графики. В целях обоснования достоверности проведена верификация результатов, полученных разными методами.

Результаты. Сформулирован подход к цифровой обработке сигналов, полученных с помощью датчиков тока цифрового измерительного трансформатора. Проведено исследование подхода определения синхронизированных значений вектора тока посредством обработки информации, полученной от первичных преобразователей тока. Осуществлен анализ характеристик алгоритма получения вектора и построены зависимости погрешностей от влияния искажающих факторов. Предложенный подход является развитием существующего подхода получения вектора за счет получения информации от датчиков тока, работающих на разных физических принципах. Показаны преимущества предложенного метода.

Выводы. Предложенный алгоритм цифровой обработки сигнала является более технически затратным, так как содержит как минимум два метрологически калиброванных измерительных канала вместо одного, однако позволяет при прочих равных условиях повысить точность и быстродействие алгоритмов цифровой обработки, взятых в качестве прототипа. Полученные результаты могут быть использованы для формирования алгоритмов измерительных органов релейной защиты.

Ключевые слова: цифровые измерительные трансформаторы тока, цифровая обработка сигналов, цифровая релейная защита, катушка Роговского, трансформатор тока, магнитотранзисторный датчик тока

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Denis Gennadievich Grigorev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone 8(4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Development and research of an approach to signal processing of digital instrument current and voltage transformers

Abstract

Background. During the development of secondary systems of stations and substations, including relay protection, automation, control, electricity metering, etc., qualitative changes have recently occurred due to the introduction of digital technologies. The introduction of digital technologies is supported by innovative development programs such as “Digital Transformation 2030”. The introduction of digital technologies is associated with the use of digital data transmission channels according to uniform standards. Projects of “digital substations” are being actively implemented with the transmission of digital information at all levels, including the primary equipment, the transmission of information both from current and voltage measuring transformers, and from switching devices. Currently, digital instrument transformers are actively being developed and implemented, in which information about measured currents and voltages is presented in digital code. New approaches to measure primary currents and voltages, and transmit information pose new challenges, and open prospects for improving signal processing methods used for relay protection purposes. Thus, the relevant aim of the study is the development and research of approaches to digital processing of signals of digital instrument current and voltage transformers.

Materials and methods. To solve the problems posed within the framework of this study, analytical and numerical solution methods have been used. Numerical methods are applied using software products such as MathCAD and the Python programming language to generate signals and display them on graphs. To substantiate the reliability, verification of the results obtained by different methods is carried out.

Results. The authors have formulated an approach to digital processing of signals obtained using current sensors of a digital instrument transformer. The authors have studied the approach to determine synchronized current vector values by processing information received from primary current converters. The characteristics of the algorithm for obtaining a vector have been analyzed and the dependences of errors on the influence of distorting factors have been plotted. The proposed approach is a development of the existing approach to obtain a vector by getting information from current sensors operating on different physical principles. The results show the advantages of the proposed method.

Conclusions. The proposed digital signal processing algorithm is more technically expensive since it contains at least two metrologically calibrated measuring channels instead of one. However, all other things being equal, it allows to increase the accuracy and speed of the digital processing algorithms taken as a prototype. The results obtained can be used to formulate algorithms for measuring relay protection devices.

Key words: digital measuring current transformers, digital signal processing, digital relay protection, Rogowski coil, current transformer, magnetotransistor current sensor

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048

Введение. Рост потребления электроэнергии – это неотъемлемая составляющая развития экономики¹. Особенно быстрое развитие энергетики происходит в мегаполисах, где увеличение сложности систем и потребления электроэнергии приводит к увеличению токов КЗ. Например, средний прогнозируемый рост потребления электроэнергии в Москве составляет 1,76 % в год, а по присоединенным к Москве территориям – 8,6 %².

Рост потребления электроэнергии приводит к увеличению сложности и взаимосвязанности энергосистем, поэтому в целях предотвращения нестабильности системы и повреждения оборудования современные схемы защиты должны быть разработаны для устранения неисправностей в пределах долей циклов основной частоты. Для этого в алгоритмах, разрабатываемых для устройств релейной защиты, предлагаются алгоритмы расчета вектора за время, меньшее, чем период промышленной частоты [1–7]. Важно отметить, что чем короче алгоритм расчета вектора основной частоты, тем сложнее добиться снижения влияния искажающих сигнал факторов, таких как высшие гармоники, апериодические составляющие токов при переходных процессах и насыщение как измерительных трансформаторов тока (ТТ), так и силового оборудования [1–3]. Следует так же заметить, что время отключения выключателя много больше времени срабатывания защиты (>60 мс), поэтому эффект от ускорения защиты может быть незаметен на общем фоне. Тем не менее разница между общим временем срабатывания в 60 и 80 мс довольно значительна, что оправдывает поиски новых методов ускорения срабатывания защит.

¹ Государственный доклад. О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2021 году. (URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/5a79eed92247fc7cb91873a107625372/Energy_efficiency_2022.pdf).

² Схема электроснабжения города Москвы (распределительные сети напряжением 6–10–20 кВ) на период до 2030 года с учетом присоединенных территорий. (URL: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/skhemu/view/41902220>)

Внедрение протокола МЭК 61850 и развитие цифровых подстанций с цифровыми измерительными трансформаторами позволяет разрабатывать новые, более совершенные алгоритмы РЗА [8, 9].

Источником сигнала для релейной защиты в рамках реализации цифровой подстанции с применением стандарта МЭК 61850 могут выступать электронные трансформаторы тока и напряжения, применяемые вместо трансформаторов, построенных на электромагнитном принципе и имеющих погрешности, обусловленные насыщением магнитопровода сердечника [10].

Повышение точности алгоритмов релейной защиты и учета электроэнергии стало возможным благодаря изобретению инновационных цифровых преобразователей тока и напряжения [11–18], обладающих такими преимуществами, как высокая точность измерения (погрешность по току и напряжению $\leq 0,1\%$), широкий частотный диапазон измерения (включая измерение постоянного тока), отсутствие насыщения, вызванного током короткого замыкания и апериодической составляющей.

В Ивановском государственном энергетическом университете совместно с НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» разработаны преобразователи тока и напряжения с использованием таких нетрадиционных датчиков, как магнитотранзисторный преобразователь, катушка Роговского (КР) для измерения тока и делитель для измерения напряжения [11–14].

Структура цифрового трансформатора [15] упрощенно представлена на рис. 1. Датчиковая система цифрового измерительного трансформатора (ЦИТ) состоит из трех сенсоров тока – классического трансформатора тока, катушки Роговского, которая измеряет не непосредственное значение тока, а его производную, и магнитотранзисторного датчика, который измеряет непосредственное значение тока, но при этом не имеет эффекта насыщения.

Относительно новыми измерительными преобразователями являются датчики тока на магнитотранзисторах и катушка Роговского.

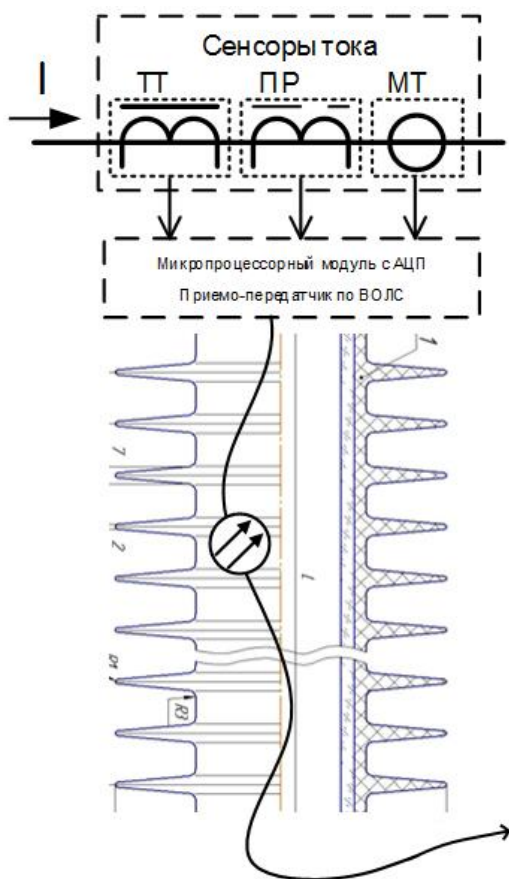


Рис. 1. Структура измерительной части цифрового трансформатора тока

Также следует отметить, что в [16–23] описано применение катушек Роговского в релейной защите в сетях низкого, среднего и высокого напряжения. В этом случае их используют для организации дифференциальной защиты таких объектов, как шины, воздушные и кабельные линии, генераторы, трансформаторы и т.п.

Однако существуют особенности катушек Роговского, которые следует учитывать при эксплуатации, например влияние смещения токопровода [24] или температуры на погрешность.

Комбинация из трех измеренных мгновенных значений тока [25] открывает доступ к разработке более прогрессивных алгоритмов РЗА, отличающихся от алгоритмов, основанных на измерениях только одного датчика.

Задача быстрого и точного вычисления амплитуды и фазы сигнала имеет приоритет для релейной защиты, так как отключение поврежденного объекта должно происходить за наикратчайший промежуток времени. Для решения этой задачи было

разработано множество алгоритмов, работающих на разных принципах.

Классически на цифровой измерительный орган поступает информация только от одного датчика тока (трансформатора тока или катушки Роговского). В рамках нашего исследования предложено использовать несколько датчиков тока, выполненных на разных физических принципах.

Анализ возможности применения нескольких датчиков представлен на основе векторного преобразования дискретизированных сигналов, являющегося основным, но не единственным способом обработки сигналов в релейной защите. В качестве прототипов предлагаемого алгоритма используются алгоритмы получения векторов на основе мгновенных значений и их производных [1].

Методы исследования. Основными методами вычисления значений амплитуды и угла тока в микропроцессорных устройствах на данный момент являются модификации преобразования Фурье, которые гарантируют вычисление параметров сигнала за 10–20 мс. Для достижения меньшего времени срабатывания защиты необходимо обратить внимание на алгоритмы, работающие с отдельными выборками. В теории цифровой обработки сигнала существует решение по получению векторов измеряемых величин на основе формул, с помощью которых амплитуда и фаза синусоидального сигнала могут быть вычислены по мгновенным значениям величин и их производных [1]:

$$U = \sqrt{u^2(t) + \left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial u}{\partial t}\right)^2};$$

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\omega \cdot u(t)}{\partial u / \partial t}\right) - \omega t.$$
(1)

Вектор сигнала, в соответствии с формулами (1), может быть записан в следующем виде:

$$\vec{U}(t) = U e^{j\omega t} = \frac{1}{\omega} \frac{\partial u}{\partial t} + j \cdot u(t).$$
(2)

Непрерывный сигнал $u(t)$ в микропроцессорных устройствах после аналогоцифрового преобразования описывается последовательностью дискретных значений, которые называются отсчетами или выборками (рис. 2).

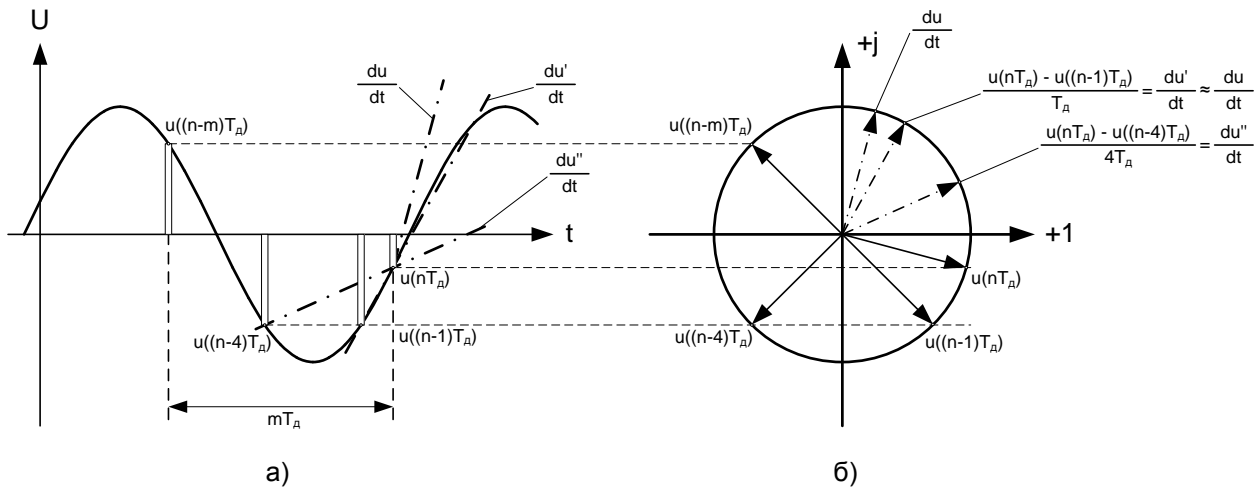


Рис. 2. Представление дискретизации сигнала: а – во времени; б – на комплексной плоскости

Текущее дискретное значение сигнала и приближенное значение его производной в (1) могут быть определены по формулам:

$$u(t) = u(n);$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{1}{T_d} [u(n) - u(n-1)], \quad (3)$$

где T_d – период дискретизации; $u(n)$ – текущая выборка сигнала; $u(n-1)$ – предыдущая выборка сигнала.

Частота дискретизации выборок крайне важна для расчета производной по формулам (3). Близкие выборки дают более точный результат, в то время как удаленные друг от друга выборки дают большую погрешность (рис. 2). Простейшим алгоритмом вычисления вектора синусоидального сигнала по мгновенным значениям является алгоритм определения вектора по двум выборкам. Суть алгоритма на основании формул (1)–(3) определяется выражением

$$\underline{u}(nT_d) = \left(\frac{N}{2\pi} + j \right) u(nT_d) - \frac{N}{2\pi} u((n-1)T_d). \quad (4)$$

Выражение (4) дает погрешность, связанную с тем, что мгновенный отсчет осуществляется в момент времени nT_d , а производная вычисляется для момента времени, отстающего от nT_d на $T_d/2$.

В [1] предлагается снижение погрешности за счет усреднения замеров или применения метода двух выборок с решением системы уравнений с использованием функции синуса, что приводит к уменьшению погрешности, но к увеличе-

нию сложности вычислительного процесса, что, в свою очередь, увеличивает требования к вычислительной мощности микропроцессора.

Наличие в ЦИТ датчиков, реализованных на разных физических принципах, позволяет получить простой алгоритм для вычисления значения амплитуды и угла вектора. Для этого будем использовать датчик, осуществляющий линейное преобразование сигнала, а также катушку Роговского, которая выдает сигнал, пропорциональный производной входного тока. В соответствии с (1), (2) нормируем сигнал КР, умножая выходной сигнал на коэффициент, пропорциональный $1/\omega$, получая одну из двух ортогональных компонент, представленных на рис. 3. Другую компоненту получим с датчика, осуществляющего прямо пропорциональное преобразование, например с магнитотранзисторного датчика тока. Таким образом, взяв одновременно всего по одной выборке с каждого датчика, мы получаем точное значение вектора (рис. 3).

Следует отметить, что точное значение вектора (без методической погрешности) будет вычисляться только для идеального синусоидального сигнала неизменной частоты.

Результаты исследования. Выполним проверку работы алгоритма при воздействии искажающих факторов: высших гармоник, аperiodической составляющей, отклонения частоты. Будем считать, что катушка Роговского откалибрована для работы на частоте 50 Гц.

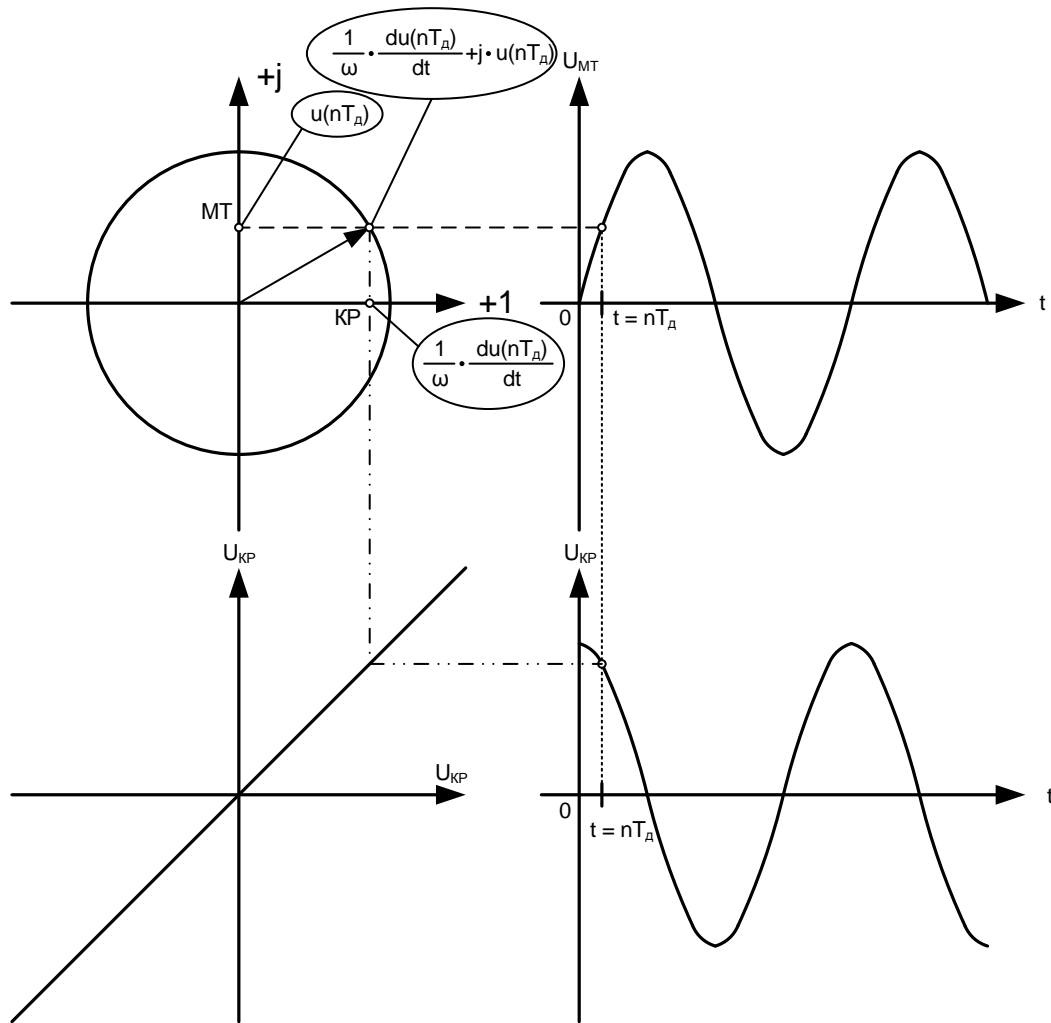


Рис. 3. Измеренные магнитотранзисторным (МТ) датчиком и катушкой Роговского сигнала, формирующие ортогональные компоненты измеряемой величины

Анализ влияния изменения частоты на работу алгоритма. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) датчика на катушке Роговского показаны на рис. 4. При увеличении частоты выходной сигнал катушки Роговского линейно возрастает в соответствии с АЧХ датчика (рис. 4,а), а фазовый сдвиг остается неизменным, равным 90° (рис. 4,б). Амплитуду и фазу другого датчика будем считать не зависящими от частоты измеряемого сигнала.

В [1] уже описаны частотные свойства алгоритма вычисления вектора по двум точкам (см. уравнение (4)), в частности показано сходство и различие алгоритма с цифровыми фильтрами. При изменении частоты в обе стороны от номинального значения область вращения вектора превращается в эллипс с двумя диаметрами: A_1 – при изменении в большую сторону, A_2 – при изменении в меньшую сторону.

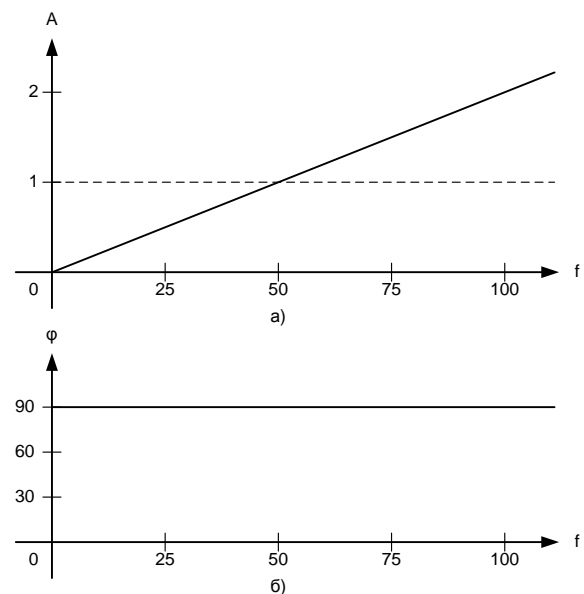


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) датчика на катушке Роговского

На рис. 5 указаны зависимости диаметров эллипса от числа выборок (рис. 5,а) и от частоты (рис. 5,б). Их анализ показывает, что увеличение числа выборок положительно влияет на сходимость диаметров к единице, однако даже при 32 выборках на период значения диаметров имеют отклонения в $\pm 5\%$ (рис. 5,а, 1 – отклонения в большую сторону, 2 – отклонения в меньшую сторону). В то же время алгоритм, основанный на двух измерительных датчиках и одной выборке ($1'$ и $2'$), не имеет погрешностей, связанных с количеством выборок, по своему принципу действия. Анализ зависимостей (рис. 5,б) показывает, что увеличение числа выборок усиливает дифференцирующие свойства алгоритма двух выборок. Для алгоритма одной выборки зависимость A_1 от частоты будет совпадать с линией $N = \infty$ при любом значении N , поскольку в алгоритме одной выборки используется дифференцирующее звено в виде КР.

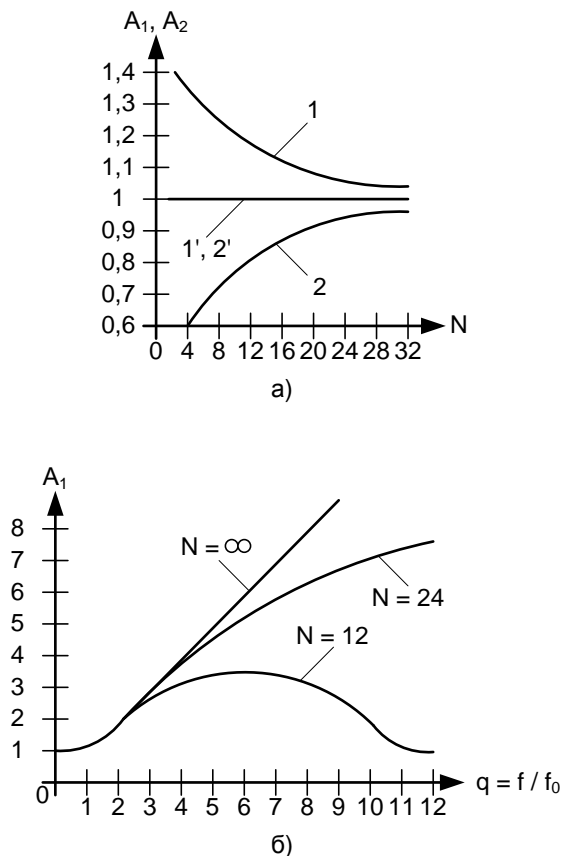


Рис. 5. Зависимости диаметров эллипса, характеризующего частотные свойства [1]: а – от числа выборок; б – от частоты

Благодаря частотной зависимости катушки Роговского при вычислении вектора будет наблюдаться увеличение или уменьшение его действительной составляющей,

поэтому относительная амплитуда вектора будет равна единице при переходе сигнала с КР через 0 и соотношению частоты к частоте 50 Гц при переходе сигнала с МТ датчика через 0. Фаза будет совершать движения вокруг нуля с равными отклонениями в отрицательной и положительной области. Результирующие АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 6, где дополнительно указана область допустимых значений отклонения частоты $\pm 0,4$ Гц³ от номинальной в нормальных режимах. Также указана зона действия нижнего уровня уставок автоматической частотной разгрузки (АЧР1) и автоматического устройства ступенчатого отключения по факту повышения частоты [26]. Анализ зависимостей (рис. 6) показывает, что при максимально допустимом отклонении частоты $\pm 0,4$ Гц в нормальном режиме погрешность по амплитуде не превышает 1%, а угловая погрешность – 15 минут, в области действия частотной автоматики $\pm 3,5$ Гц погрешность по амплитуде не превышает 1,07%, а угловая погрешность – 35 минут.

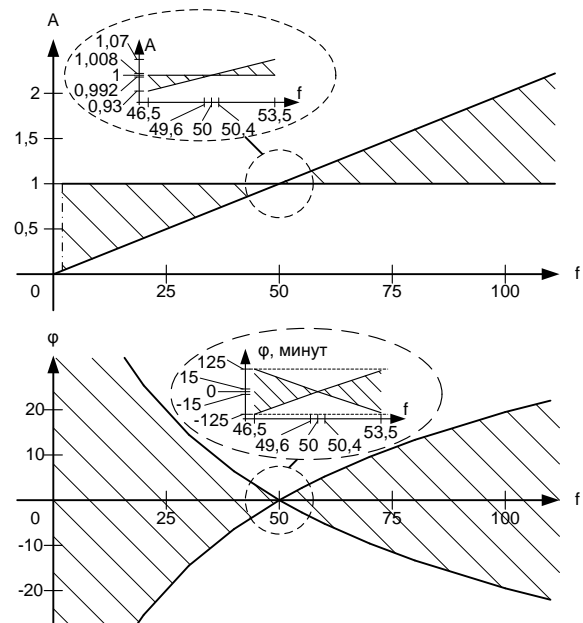


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ при отклонении частоты

Продemonстрируем поведение сигнала при изменении частоты (рис. 7). График на рис. 7,а изображает сигнал с МТ датчика, на рис. 7,б – сигнал с КР, амплитуда которого растет с ростом частоты.

³ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

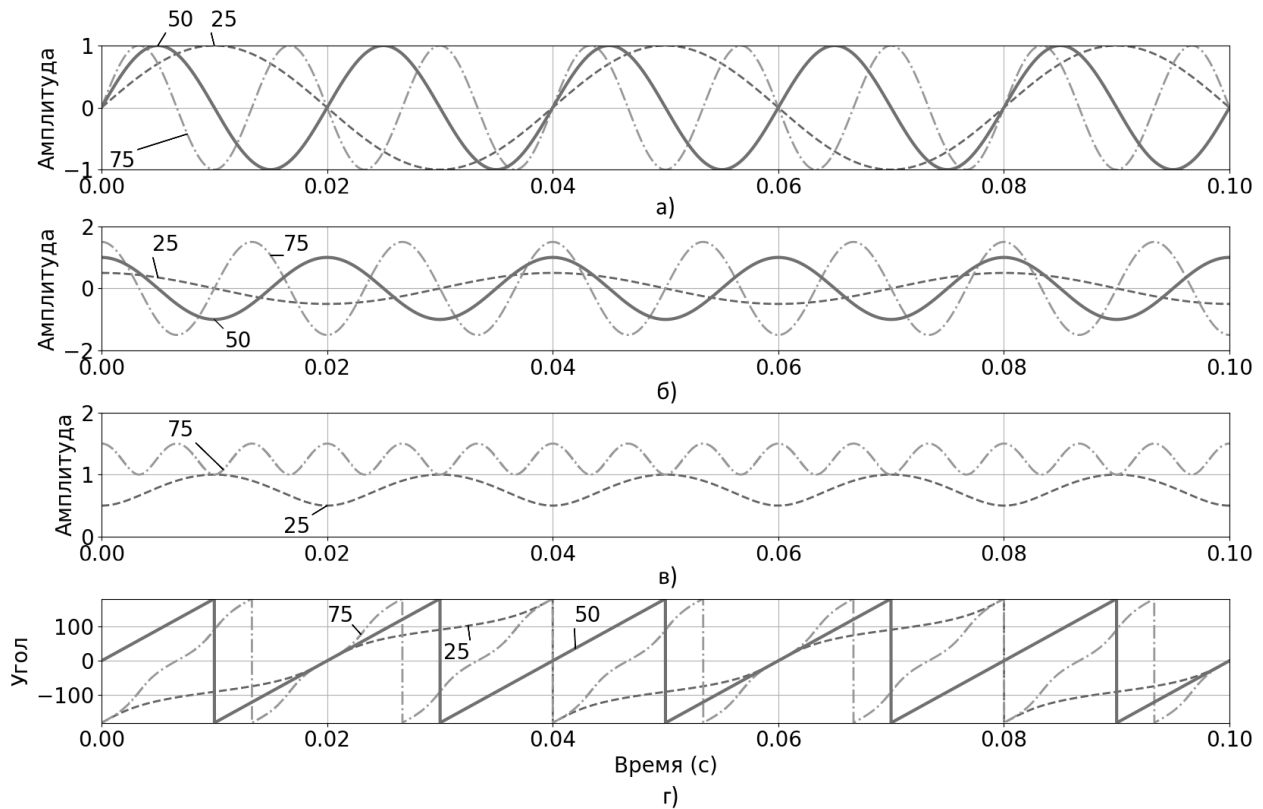


Рис. 7. Сигналы с МТ датчика (а), с КР (б), вычисленная амплитуда вектора (в) и абсолютное значение угла (г) при частотах $f = 25$ Гц, $f = 50$ Гц, $f = 75$ Гц

На рис. 7,в показан общий для двух годографов график – график амплитуды, рассчитанной по одной выборке. График на рис. 7,г показывает абсолютный угол, вычисленный как соотношение синусной и косинусной составляющих (сигналов с МТ датчика и КР) без привязки к опорному вектору. Можно заметить, что график угла для 50 Гц имеет монотонный рост. Это связано с тем, что амплитуды синусной и косинусной составляющих равны. Расхождение значений амплитуд формирует области ускоренного и замедленного движения угла.

Дадим объяснение поведению углов (рис. 7) используя годографы эллипса и круга (рис. 8, где показана половина эллипса и опорная окружность, по которым происходит вращение векторов). Траектории движения соотношены путем разметки точек на обеих фигурах через равные промежутки времени и объединения одновременно измеренных точек с разных фигур штрихпунктирной линией. В нулевой момент времени (при пересечении оси X) абсолютные углы, равные арктангенсу соотношения компоненты оси Y к компоненте оси X, будут равны нулю. Дальнейшее увеличение времени вызывает движение векторов. Первые 5–10 точек на окружности геометрически

располагаются крайне близко друг к другу, в то время как соотношение $\Delta y/\Delta x$ в соответствующих точках на эллипсе значительно изменяется, приводя к опережению абсолютного угла эллипса относительно абсолютного угла окружности. При приближении к оси Y значение арктангенса обоих векторов стремится к 90 градусам, таким образом вектора сокращают значение относительного угла. Данный колебательный характер относительного угла проявляется во всех точках траектории движения векторов, кроме 0, 90, 180 и 270 градусов по годографу, где значение становится равным нулю. Между этими градусами дважды за период относительный угол получает максимальное и минимальное значение, прямо пропорциональное зависящее от величины большего радиуса эллипса.

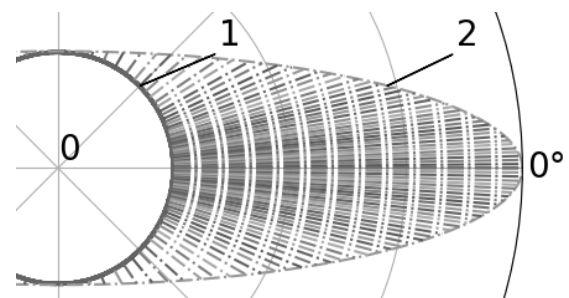


Рис. 8. Годографы эллипса (2) и круга (1)

При повороте эллипса на годографе в ту или иную сторону вышеописанные закономерности сохраняются со следующей особенностью: относительный угол становится равен нулю при пересечении вектором большего или меньшего радиуса эллипса.

Построенная на рис. 6 ФЧХ соответствует случаю, когда полученный вектор сравнивается с опорным вектором той же частоты, имеющим единичную амплитуду при любом угле и плавное движение абсолютного угла (по характеру совпадает с графиком угла 50 Гц на рис. 7, но отличается частотой). Опорный вектор здесь не нужен для устранения вращательной компоненты ωt вектора. Полученный по алгоритму одной выборки вектор будет иметь эллипсоидную форму траектории при движении абсолютного угла вектора. Это приводит к небольшой колебательности относительного угла – до ± 20 градусов на 100 Гц (см. рис. 6). Изобразим годограф для данного случая (рис. 9,а). Можно заметить, что отклонения частоты в этом случае приводят к появлению на годографе окружностей, проходящих через точку (1; 0) дважды за период.

Рассмотрим другой случай: используем глобальную синхронизацию с точным временем, за опорный вектор берем идеальный единичный вектор с неизменной частотой 50 Гц (например, полученный с помощью точного кварцевого генератора и синхроимпульсов GPS). Тогда годограф примет вид, показанный на рис. 9,б, где относительный угол для каждой частоты меняется в широком диапазоне – от -180 до 180 градусов. Это вызывает полный поворот вектора по годографу за определенное время, равное периоду разности частот опорного вектора и вычисленного по алгоритму.

Примем, что опорный вектор имеет ту же частоту, что и частота вычисленного вектора. В соответствии с нормативной документацией на измерительные ТТ⁴, для класса 10P и нормального режима работы амплитудная погрешность попадает в необходимый диапазон с более чем десятикратным запасом (изменение амплитуды до $\pm 0,8\%$), а угловая не нормируется, но попадает в диапазон для более точных

классов 1, 0,5 и 0,5S, к которым предъявляются более строгие требования (изменение угла менее ± 15 минут); при аварийном снижении или повышении частоты амплитудная погрешность попадает в пределы класса точности с хорошим запасом (максимальное изменение амплитуды $\pm 7\%$), а угловая погрешность не попадает в диапазоны указанных выше классов (максимальное изменение угла $\pm 124\text{--}125$ минут).

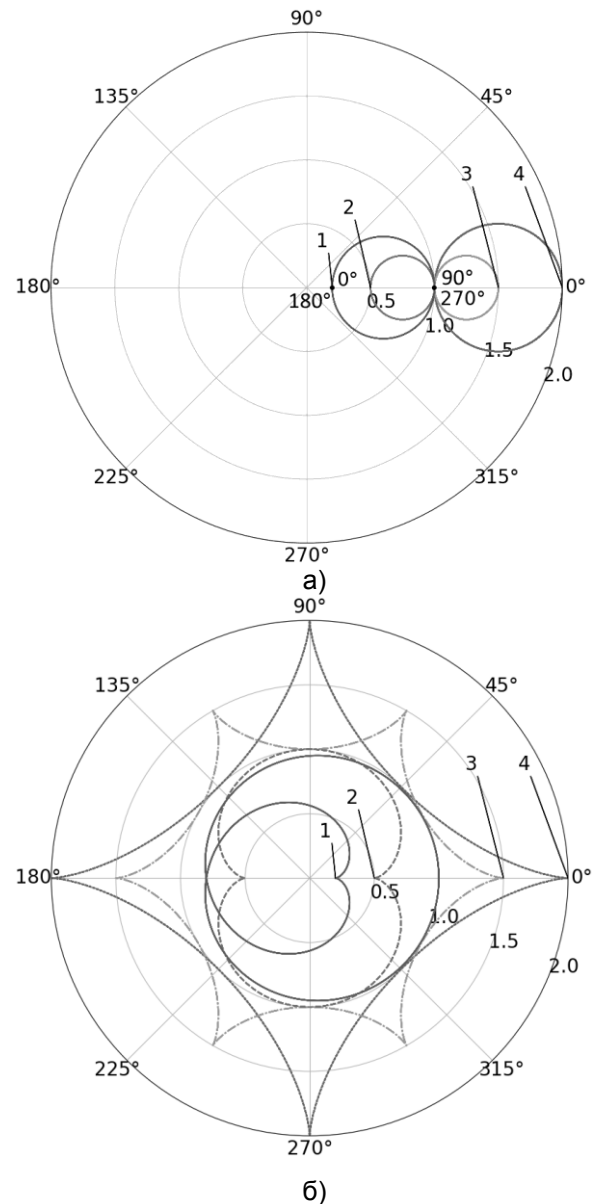


Рис. 9. Годографы для случая идеального опорного вектора с совпадающей (а) и неизменной (б) частотой при частоте сигнала $f = 10$ Гц (1), $f = 25$ Гц (2), $f = 75$ Гц (3), $f = 100$ Гц (4)

Рассмотрим возможность снижения погрешности вплоть до полного ее устранения путем введения корректирующего коэффициента в сигнал, получаемый с КР.

⁴ ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

Выше было отмечено, что сигнал, получаемый с КР, зависит от частоты, а отклонения частоты приводят к эллипсоидному движению вектора. Дважды за период сигнал с КР проходит свое минимальное и максимальное значения, как и сигнал с другого датчика. Следовательно, взяв выборки сигнала за полпериода, мы можем найти амплитуду как сигнала с КР, так и сигнала с МТ датчика. Их соотношение дает нам соотношение частоты в сети к частоте, на которой была откалибрована КР. Умножив сигнал с КР на величину, обратную соотношению частот, мы обновим калибровку КР до актуального значения частоты. Выше-описанное представляется следующей формулой:

$$U_{\text{КР}} = k_f k_{\text{КР}} U_{\text{КР}}, \tag{5}$$

где $U_{\text{КР}}$ – напряжение на КР; $k_{\text{КР}}$ – калибровочный коэффициент КР; k_f – корректировочный коэффициент по частоте, равный соотношению максимумов сигналов МТ и КР (без учета корректировки).

После получения k_f корректируем $U_{\text{КР}}$ по формуле (5), получая нормированное значение напряжения для установившейся в сети частоты. При отклонении частоты сети процесс корректировки повторяется.

Анализ влияния аperiodической составляющей на измерение амплитуды и фазы. Выполним моделирование пере-

ходного процесса в простейшей цепи (рис. 10). Сам переходный процесс описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I(t) = I_{\text{устДоКЗ}}(t) \text{ при } t < t_{\text{КЗ}}, \\ I(t) = I_{\text{устКЗ}}(t) + A \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{КЗ}})}{\tau}}, \\ A = I_{\text{устДоКЗ}}(t_{\text{КЗ}}) - I_{\text{устКЗ}}(t_{\text{КЗ}}), \end{cases} \tag{6}$$

где $I_{\text{устДоКЗ}}$ – установившаяся составляющая тока до КЗ; $I_{\text{устКЗ}}$ – установившаяся составляющая тока КЗ; $t_{\text{КЗ}}$ – время возникновения КЗ; A – амплитуда аperiodической составляющей; τ – постоянная времени.

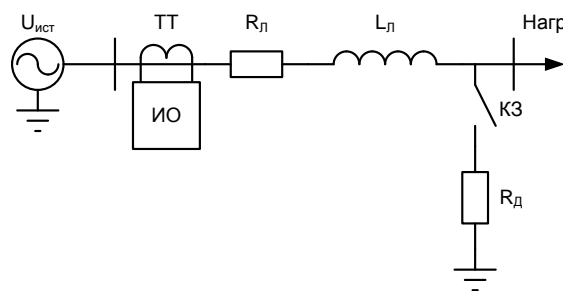


Рис. 10. Модель сети с аperiodической составляющей

Примем постоянную времени затухания $\tau = 0,06$ с и амплитуду как 25, 50, 75 и 100 % от амплитуды сигналов, представленных на рис. 11.

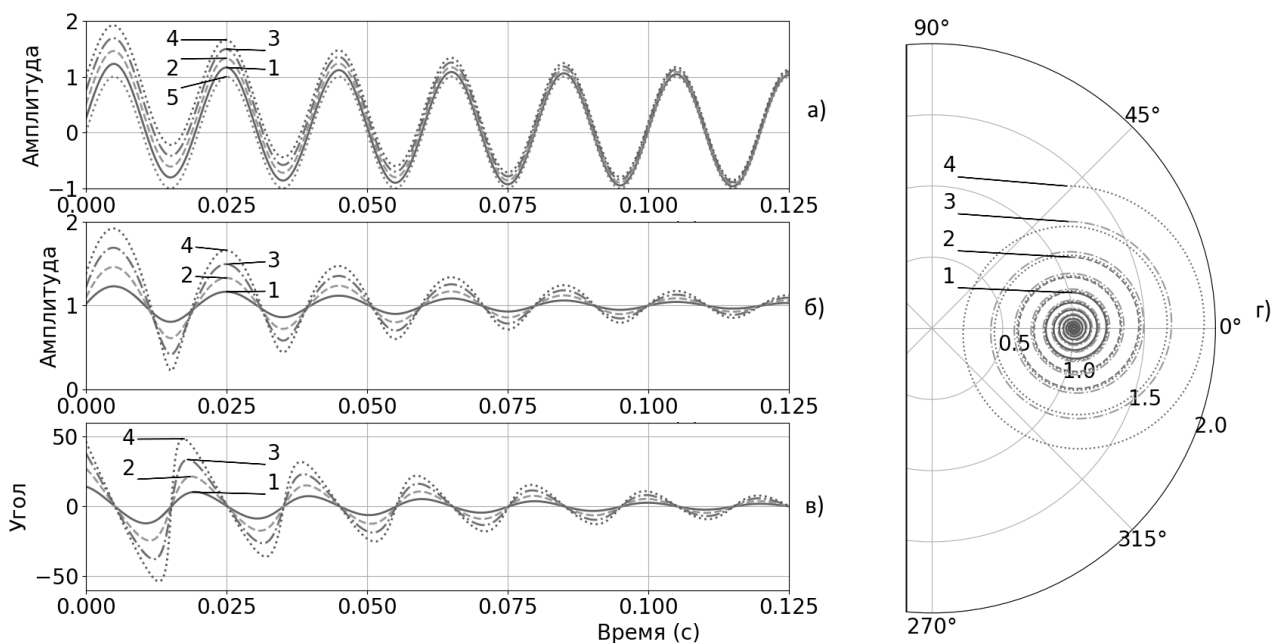


Рис. 11. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при $A = 0,25$ (1), $A = 0,5$ (2), $A = 0,75$ (3) и $A = 1$ (4) и $A = 0$ (5)

На рис. 11,а изображены сами входные сигналы, на рис. 11,б представлен результат расчета амплитуды, вычисленной предложенным способом определения вектора по мгновенному значению, на рис. 11,в изображено расчетное значение угла. Можно наблюдать увеличение отклонения амплитуды и угла от установившегося состояния с ростом амплитуды аperiodической составляющей. С ростом амплитуды аperiodической составляющей точки экстремума угла смещаются влево в положительной полуволне и вправо в отрицательной полуволне, ускоряя процесс перехода от отрицательного к положительному экстремуму. На комплексной плоскости данный результат имеет вид ниспадающей спирали, стремящейся к установившемуся состоянию (точка с амплитудой 1 на оси X (рис. 11,г)).

Можно заметить, что спираль годографа делает один оборот вокруг центра вращения за период основной частоты, отличаясь от предыдущего значения на величину, пропорциональную постоянной времени. Приближенное значение центра спирали (установившейся составляющей) можно установить путем комплексной (векторной) полусуммы точек, отстоящих друг от друга на время половины периода основной частоты (0,01 с). Полученный вектор будет располагаться около точки установившегося значения, обладая при этом небольшой погрешностью, равной половине разности значений аperiodической составляющей в моменты взятия исходных векторов. Таким образом, при медленном

протекании переходного процесса мы можем получить достоверное значение вектора без существенного влияния аperiodической составляющей.

Анализ влияния высших гармонических составляющих на измерение амплитуды и фазы. Примем наличие третьей гармоники и изменим ее амплитуду так, чтобы она составляла 10, 20, 30 и 40 % от амплитуды исходного сигнала (рис. 12). Наличие синфазной третьей гармоники приводит к несимметричным искажениям замера амплитуды относительно оси X и к симметричным искажениям замера угла. С увеличением амплитуды гармоники экстремумы амплитуды и угла замера также увеличиваются по оси Y, не смещаясь по оси времени. В комплексной плоскости это проявляется как увеличивающийся с ростом амплитуды третьей гармоники треугольник с центром в точке (1; 0) и гранями, имеющими изгиб к центру.

Моделирование изменения фазного угла третьей гармоники от 0 до 90 градусов с шагом 30 при амплитуде 40 % представлено на рис. 13. Изменение угла гармоники при неизменной амплитуде приводит к комплексному изменению замера: смещению локальных пиков, изменению их величины. Однако на комплексной плоскости все сводится к вращению треугольника против часовой стрелки относительно своего центра. Примем наличие различных гармоник от 2 до 5 при амплитуде 10 % от основной (рис. 14).

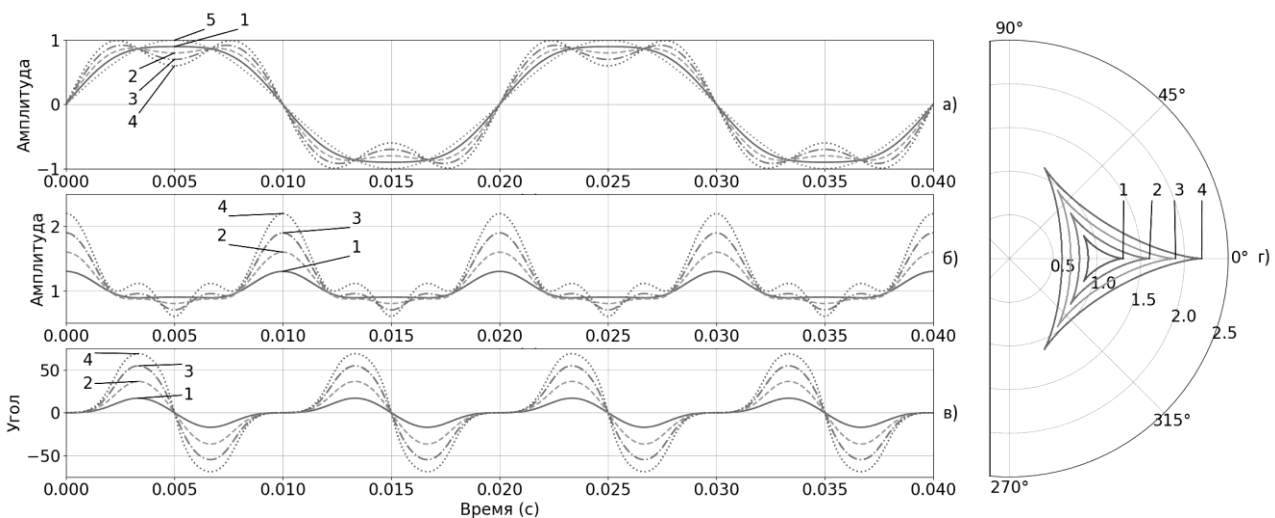


Рис. 12. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при $A = 0,1$ (1), $A = 0,2$ (2), $A = 0,3$ (3) и $A = 0,4$ (4) и отсутствии гармоники (5)

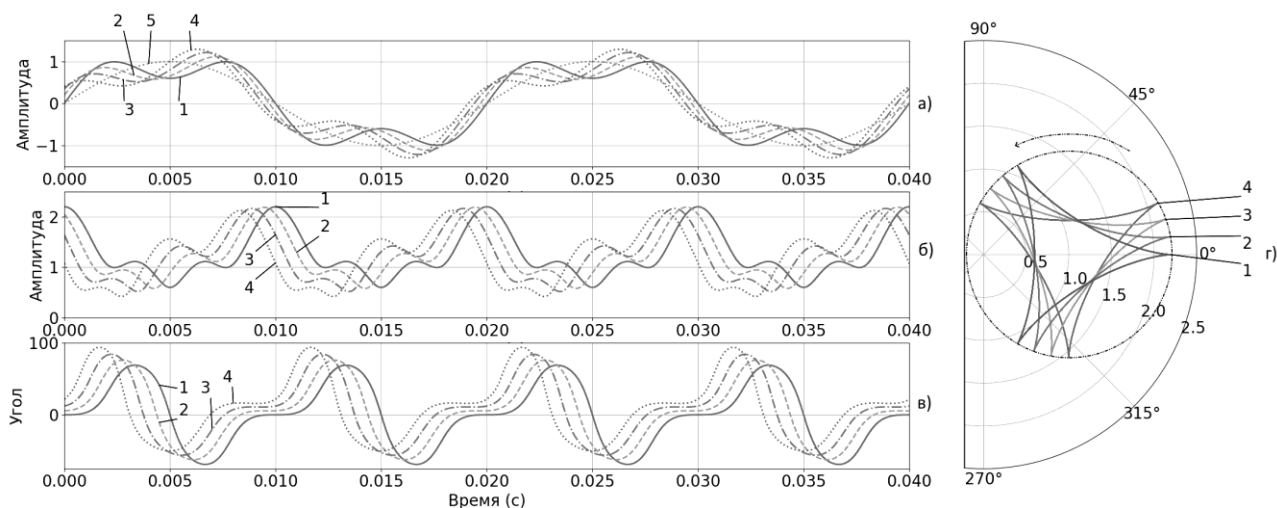


Рис. 13. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора, его годограф (г) при углах 0 (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4) и отсутствии гармоники (5)

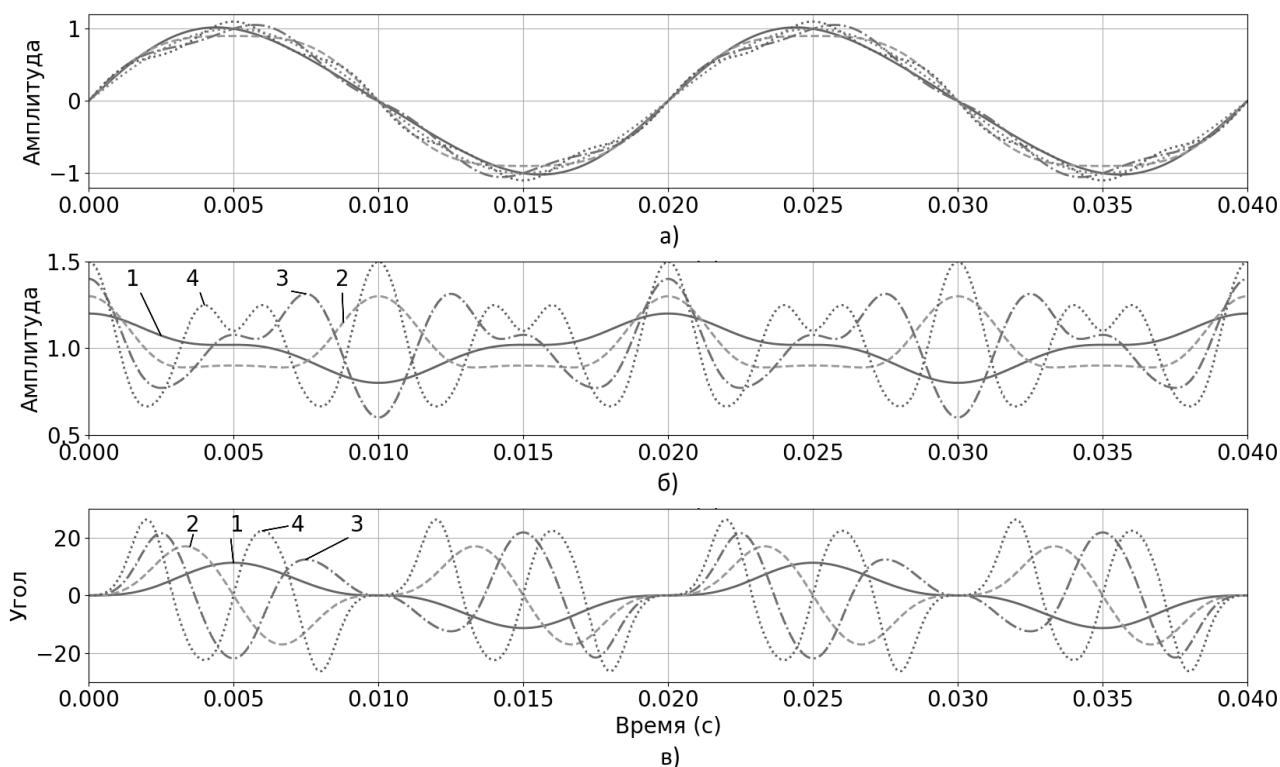


Рис. 14. Исходные сигналы (а), замеры амплитуды (б) и фазы (в) вектора при гармониках $N = 2$ (1), $N = 3$ (2), $N = 4$ (3), $N = 5$ (4)

Наличие в сигнале кратных гармоник также приводит к трудноанализируемым обычным образом изменениям замеров амплитуды и угла, однако в комплексной плоскости полученные результаты вырождаются в гипоциклоиды с числом каспов (пиков) $2N$ для четных гармоник и N для нечетных (рис. 15).

Анализ влияния скачкообразного изменения тока. Рассмотрим разницу в работе двух алгоритмов в момент возникновения короткого замыкания: по одной выборке с использованием двух датчиков и по двум выборкам с использованием одного датчика. Примем следующее: ток до КЗ – 1 о.е., ток после КЗ – 4 о.е., АЦП обрабатывает 12 выборок за период промышленной частоты (рис. 16).

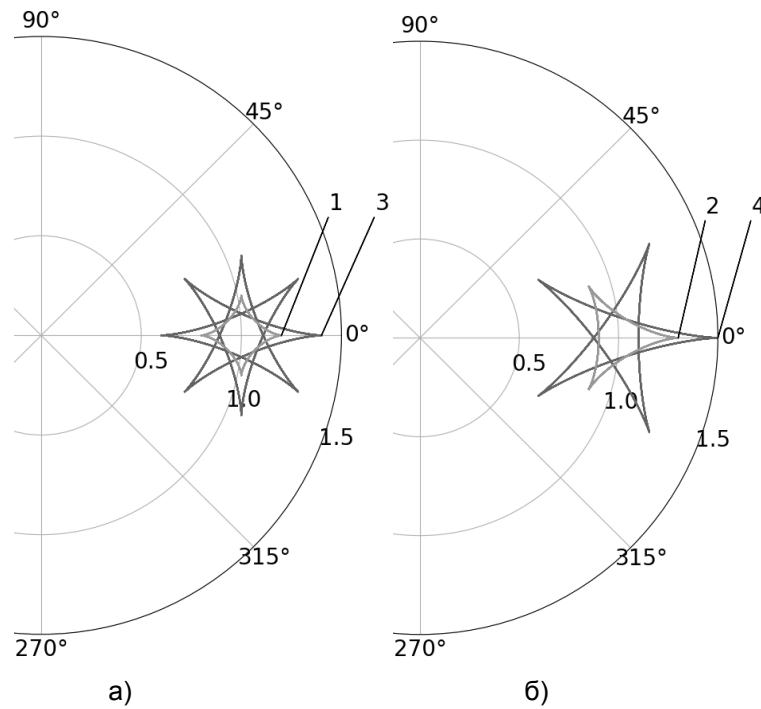


Рис. 15. Годограф вектора при гармонической составляющей $N = 2$ (1), $N = 3$ (2), $N = 4$ (3) и $N = 5$ (4): а – четные гармоники; б – нечетные гармоники

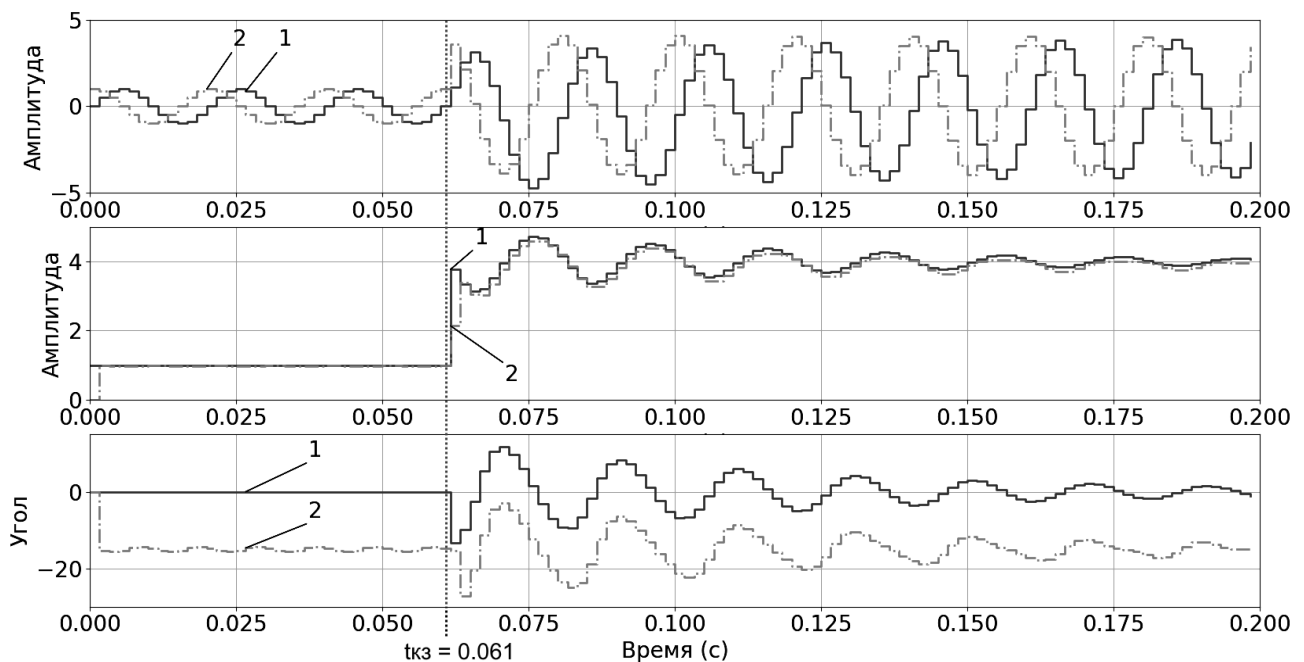


Рис. 16. Исходные сигналы с ТТ и КР (1 и 2 соответственно на верхнем графике) и замер амплитуды и фазы вектора двумя различными алгоритмами: по одной выборке (1) и по двум выборкам (2)

Анализ полученных результатов показывает, что алгоритм двух выборок обладает задержкой в переходных режимах, а также имеет постоянную угловую погрешность, равную половине разницы между углами соседних выборок (15 градусов для 12 выборок на период). Аперiodическая составляющая действует на алгоритмы схожим образом, поэтому угол и ампли-

туда вектора колеблются около одного установившегося состояния.

В момент КЗ происходит плавное изменение сигнала тока, но резкое изменение его производной. Алгоритм, основанный на измерении мгновенного значения одной точки, не испытывает никаких дополнительных погрешностей, связанных с этим явлением. Иначе ведет себя алго-

ритм, основанный на измерении двух точек: так как алгоритм использует усреднение двух точек замера, а КЗ произошло в момент перехода тока через 0, значение синусной компоненты оказалось в 2 раза меньше, чем оно есть в реальности. Вычисленное значение производной также оказалось неверным – 2 против реального 3,6. В итоге оказалось неверным определенное значение амплитуды вектора – 2,15 против 3,75 по алгоритму с одной выборкой. Погрешность составила 6,25 % для алгоритма с одной выборкой и 46,25 % для алгоритма с двумя выборками (или же 42,67 %, если принять значение 3,75 за идеальное и 2,15 за сравниваемое).

Выводы. Сравнение существующего метода получения вектора сигнала (тока) с предложенным способом получения вектора тока путем цифровой обработки сигналов, полученных с помощью датчиков цифрового измерительного трансформатора тока, показывает, что предложенный подход получения вектора является развитием существующего подхода за счет получения информации от датчиков тока, работающих на разных физических принципах, но при этом имеет ряд преимуществ.

Анализ характеристик алгоритма получения вектора и зависимостей погрешностей от влияния таких искажающих факторов, как изменение частоты, наличие апериодической составляющей, наличие высших гармоник, позволил предложить способы снижения влияния этих факторов. Устранение влияния высших гармоник в соответствии с теоремой Найквиста требует более сложных алгоритмов с числом замеров не менее двух на период частоты наибольшей гармоники.

Предложенный алгоритм цифровой обработки сигнала является более технически затратным, так как содержит как минимум два метрологически калиброванных измерительных канала вместо одного, однако позволяет при прочих равных условиях повысить точность и быстродействие алгоритмов цифровой обработки, взятых в качестве прототипа.

Показана возможность снижения влияния апериодической составляющей тока переходного процесса и устранения влияния изменения частоты сети на получаемый с помощью предложенного алгоритма вектор. Полученные результаты могут быть использованы для формирования

алгоритмов измерительных органов релейной защиты.

Вопросы метрологии и поверки системы с двумя датчиками тока, реализованными на разных физических принципах, должны стать объектом дальнейшего исследования.

Список литературы

1. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. **Horowitz S.H., Phadke A.G.** Power systems relaying. – 3rd ed. – West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, Ltd, 2008.
3. **Honorato T.R., Silva K.M.** Half-Cycle DFT-Based Phasor Estimation Algorithm for Numerical Digital Relaying // 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). – Brasília, Brazil, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2018.8604396.
4. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer Relaying for Power Systems. – 2 ed. – JohnWiley & Sons Inc, West Sussex, UK, 2009.
5. **Chen Ching-Shan, Liu Chih-Wen, Jiang J.-A.** Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006, April. – Vol. 21, no. 2. – P. 619–626. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858808.J
6. **Rosolowski E., Izykowski E., Kasztenny B.** New half-cycle adaptive phasor estimator immune to the decaying DC component for digital protective relaying // Proceedings of the 32nd Annual North American Power Symposium. – Waterloo, Canada, 2000.
7. **Revyakin V.A., Pletnev S.V., Klimova T.G.** Using the Fourier Transform of the Half-Cycle to Enhance the Application of the PMU // 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). – M., 2020. – P. 1–14. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301744.
8. **Аношин А.О., Головин А.В.** Протоколы связи в электроэнергетике. Предпосылки для создания стандарта МЭК 61850 // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – № 3(75).
9. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д., Гречухин М.А.** Стратегия и технические решения по обеспечению цифровыми ТТ и ТН метрологии и надежности систем РЗА и учета электроэнергии на подстанциях 110–220 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 58–63. – EDN PCDXGP
10. **Horak J., Hrabliuk J.** Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs, 2016. – URL: http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35–42. – EDN HFLWBF.

12. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № SD. – С. 98–99.

13. **Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Нестерихин А.Е.** Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 03–07 июля 2013 года. – Екатеринбург: Российский национальный комитет СИГРЭ, 2013. – С. 167–173. – EDN IBAGSO.

14. **Specific features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering / V.D. Lebedev, A.A. Yablokov, G.A. Filatova, N.V. Lebedeva // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. – 2018. – P. 8537187.**

15. **Пат.** на полезную модель № 174357 U1 Российская Федерация, МПК G01R 19/00, G01R 27/08. Цифровой трансформатор тока и напряжения / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, Д.А. Лебедев и др.; № 2017112540; заявл. 12.04.2017; опублик. 11.10.2017 заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Цифровые измерительные трансформаторы». – EDN PIYXRF.

16. **Релейная защита «мертвой» зоны распределительных устройств объектов электроэнергетики / А.В. Жуков, В.С. Воробьев, А.И. Расщепляев и др. // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. XXII конф., Москва, 27–29 мая 2014 года. – М., 2014. – С. 14–20. – EDN ABNVND.**

17. **Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes / V. Lebedev, V. Shuin, A. Yablokov, G. Filatova // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – Tomsk, 2014.**

18. **Filatova G., Lebedev V., Shuin V.** Study of possibility of digital voltage transformers usage in fault location determination // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4.

19. **Kojovich L.A., Bishop M.M.** Modern relay protection using current sensors based on Rogowski coil // Proceedings of the International Conference on Actual Trends in Development of

Power System Protection and Automation. – Moscow, 2009. – P. 39–48.

20. **Kuvshinov G.G.** Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics. – Vladivostok, 2012. – P. 316.

21. **Кожович Л.** Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным ТТ. – URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>

22. **Kojovic L.A.** PCB Rogowski Coils–High Precision Low Power Sensors, Materials of CIGRE Session. 2004. <http://www.transform.ru/articles/pdf/SIGRE/a3-102.pdf>

23. **Kojovic L.** Rogowski coils suit relay protection and measurement. IEEE Computer Applications // Power. – 1997. – Vol. 10, no. 3. – P. 47–52.

24. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А., Нестерихин А.Е.** Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 30–34. – EDN RRYZSN.

25. **Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. – 2023. – № 1(45). – С. 42–49. – EDN TLKQBG.**

26. **Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Кац И.М.** Автоматическое управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах: учеб. пособие. Ч. 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2013. – 124 с.

References

1. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya reley'naya zashchita* [Digital Relaying]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.

2. Horowitz, S.H., Phadke, A.G. Power systems relaying. West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, Ltd, 2008.

3. Honorato, T.R., Silva, K.M. Half-Cycle DFT-Based Phasor Estimation Algorithm for Numerical Digital Relaying. 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). Brasília, Brazil, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2018.8604396.

4. Phadke, A.G., Thorp, J.S. Computer Relaying for Power Systems. JohnWiley & Sons Inc, West Sussex, UK, 2009.

5. Chen, Ching-Shan, Liu, Chih-Wen, Jiang, J.-A. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, April, vol. 21, no. 2, pp. 619–626. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858808.J

6. Rosolowski, E., Izykowski, E., Kasztenny, B. New half-cycle adaptive phasor estimator immune

to the decaying DC component for digital protective relaying. Proceedings of the 32nd Annual North American Power Symposium. Waterloo, Canada, 2000.

7. Revyakin, V.A., Pletnev, S.V., Klimova, T.G. Using the Fourier Transform of the Half-Cycle to Enhance the Application of the PMU. 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). Moscow, 2020, pp. 1–14. DOI: 10.1109/RPA51116.2020.9301744.

8. Anoshin, A.O., Golovin, A.V. Protokoly svyazi v elektroenergetike. Predposylki dlya sozdaniya standarta MEK 61850 [Communication protocols in the electric power industry. Prerequisites for the creation of the IEC 61850 standard]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2012, no. 3(75).

9. Grechukhin, V.N. Strategiya i tekhnicheskie resheniya po obespecheniyu tsifrovymi TT i TN metrologii i nadezhnosti sistem RZA i ucheta elektroenergii na podstantsiyakh 110–220 kV [Strategy and technical solutions for providing digital CT and VT metrology and reliability of relay protection and electricity metering systems at 110–220 kV substations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 3(8), pp. 58–63. EDN PCDXGP.

10. Horak, J., Hrabliuk, J. Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs, 2016. Available at: http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf

11. Grechukhin, V.N. Elektronnye transformatory toka i napryazheniya. Sostoyanie, perspektivy razvitiya i vnedreniya na ORU 110–750 kV stantsiy i podstantsiy energosistem [Electronic current and voltage transformers. Status, prospects for development and implementation at outdoor switchgear 110–750 kV stations and substations of power systems]. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 4, pp. 35–42. EDN HFLWBF.

12. Grechukhin, V.N., Lebedev, V.D. Tsifrovoy kombinirovanny transformator toka i napryazheniya na baze standartnogo transformatora napryazheniya [Digital combined current and voltage transformer based on a standard voltage transformer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2010, no. SD, pp. 98–99.

13. Lebedev, V.D., Filatova, G.A., Nesterikhin, A.E. Izmeritel'nye preobrazovateli toka dlya tsifrovyykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki [Current measuring transducers for digital relay protection and automation devices]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennyye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem". Ekaterinburg, 03–07 iyul'ya 2013 goda* [Proceedings of the IV International scientific technical conference "Current trends of development of relay protection systems and automation of power systems". Ekaterinburg, July 03–07, 2013]. Ekaterin-

burg: Rossiyskiy natsional'nyy komitet SIGRE, 2013, pp. 167–173. EDN IBAGSO.

14. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Filatova, G.A., Lebedeva, N.V. Specific features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering. 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA, 2018, p. 8537187.

15. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Lebedev, D.A., Naumov, A.V., Mironov, S.V. *Tsifrovoy transformator toka i napryazheniya* [Digital current and voltage transformer]. Patent RF, no. 174357, 2017. EDN PIYXRF.

16. Zhukov, A.V., Vorob'ev, V.S., Rashcheplyayev, A.I., Artsishevskiy, A.L., Kuzin, A.S., Borisov, R.K., Lebedev, V.D. Releynaya zashchita «mertvoy» zony raspredelitel'nykh ustroystv ob"ektov elektroenergetiki [Relay protection of the «dead» zone of switchgears of electric power facilities]. *Sbornik dokladov XXII konferentsii "Releynaya zashchita i avtomatika energosistem", Moskva, 27–29 maya 2014 goda* [Proceedings of the XXII conference "Relay protection and automation of power systems", Moscow, May 27–29, 2014]. Moscow, 2014, pp. 14–20. EDN ABNVND.

17. Lebedev, V., Shuin, V., Yablokov, A., Filatova, G. Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes. Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Tomsk, 2014.

18. Filatova, G., Lebedev, V., Shuin, V. Study of possibility of digital voltage transformers usage in fault location determination. Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016, pp. 1–4.

19. Kojovich, L.A., Bishop, M.M. Modern relay protection using current sensors based on Rogowski coil. Proceedings of the International Conference on Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation. Moscow, 2009, pp. 39–48

20. Kuvshinov, G.G. Modern directions of the development of the measuring current converters for relay protection and automatics. Vladivostok Branch of Russian Customs Academy (VBRCA). Vladivostok, 2012, p. 316.

21. Kozhovich, L. *Katushki Rogovskogo – real'naya al'ternativa traditsionnym TT* [Rogowski coils – a real alternative to traditional CTs]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>

22. Kojovic, L.A. PCB Rogowski Coils–High Precision Low Power Sensors, Materials of CIGRE Session, 2004. Available at: <http://www.transform.ru/articles/pdf/SIGRE/a3-102.pdf>

23. Kojovic, L. Rogowski coils suit relay protection and measurement. IEEE Computer Applications in Power, 1997, vol. 10, no. 3, pp. 47–52.

24. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Nesterikhin, A.E. Issledovanie pogreshnostey izmereniya toka poyasom Rogovskogo na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya [Study of current measurement errors using a Rogowski coil based on mathematical and physical modeling]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 30–34. EDN RRYZSN.

25. Lebedev, V.D., Kuzmina, N.V., Grigorev, D.G., Litvinov, S.N., Petrov, A.E. Teoriya i praktika primeneniya tsifrovyykh izmeritel'nykh

transformatorov toka i napryazheniya [Theory and practice of using digital instrument current and voltage transformers]. *Releyshchik*, 2023, no. 1(45), pp. 42–49. EDN TLKQBG

26. Vaynshteyn, R.A., Shestakova, V.V., Kats, I.M. *Avtomatskoye upravlenie elektroenergeticheskimi sistemami v normal'nykh i avariynykh rezhimakh. Ch. 2* [Automatic control of electrical power systems in normal and emergency modes. Part 2]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013. 124 p.