



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2316-2278>, vasilkasimov@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время, наряду с первоначальной областью применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ), связанной с системами мониторинга переходных режимов (СМНР), все большее внимание уделяется расширению сферы применения указанной технологии. Цифровые подстанции (ЦПС) являются одним из мест генерации сигналов СВИ для СМНР, одновременно эти СВИ предлагается использовать для целей релейной защиты и автоматики на самой ЦПС, что облегчит построение централизованных систем релейных защит на ЦПС. ЦЕЛЬ. Рассмотреть вопросы применения технологии СВИ на ЦПС четвертого типа, в качестве замены сигналов *Sampled Values (SV)*. Рассмотреть дополнения к стандартному набору сигналов СВИ, необходимые для работы различных релейных защит на цифровой подстанции. Выполнить анализ точности расчета СВИ при изменении частоты контролируемого тока и напряжения относительно номинального значения, при появлении в измеренном сигнале высших гармоник. Разработать методику предвычислений для алгоритмов релейной защиты. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод расчета полной погрешности измерения СВИ TVE (*Total Vector Error*) – величина, характеризующая отклонение амплитуды и фазы измеренного вектора от их заданных значений. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности работы ЦПС четвертого типа, необходимый набор сигналов СВИ для работы релейной защиты. Произведен расчет погрешности измерения СВИ при отклонении частоты сети от номинального значения, при наличии высших гармоник. В данной статье предложен метод предвычислений для алгоритмов релейной защиты. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование сигналов СВИ с необходимыми дополнениями для работы релейной защиты снижает нагрузку на цифровую сеть ЦПС, упрощает работу алгоритмов релейной защиты. Расчеты показали, что погрешности измерения СВИ не превышают нормативных значений. Предлагаемые методы предвычислений позволяют ускорить работу алгоритмов релейной защиты.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения; СВИ; цифровая подстанция; ЦПС; *Sampled Values*; *SV*; *TVE*; релейная защита.

Для цитирования: Мустафин Р.Г., Касимов В.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для выполнения функций релейной защиты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 110-123. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-110-123.

USE OF SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENTS TECHNOLOGY FOR PERFORM RELAY PROTECTION FUNCTIONS

RG. Mustafin, VA. Kasimov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasilkasimov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2316-2278>, vasilkasimov@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. Recently, along with the initial scope of synchronized vector measurements (synchrophasor) technology associated with Wide Area Measurement System (WAMS), more and more attention is paid to expanding the scope of this technology. Digital

substations are one of the places for generating synchrophasor signals, at the same time, synchrophasor data are proposed to be used for the purposes of relay protection and automation at the digital substations itself, which will facilitate the construction of centralized relay protection systems at the substation. **THE PURPOSE.** Consider the use of synchrophasor technologies at a digital substation of the fourth type, as a replacement for Sampled Values (SV) signals. Consider additions to the standard set of synchrophasor signals necessary for the operation of various relay protections at a digital substation. Perform an analysis of the accuracy of calculating the synchrophasor when the frequency of the controlled current and voltage changes relative to the nominal value, when higher harmonics appear in the measured signal. Develop a pre-computation technique for relay protection algorithms. **METHODS.** When solving the problem, the method of calculating the total measurement error of the synchrophasor TVE (Total Vector Error) was used - a value that characterizes the deviation of the amplitude and phase of the measured vector from their specified values. **CONCLUSION.** The use of synchrophasor signals with the necessary additions for the operation of relay protection reduces the load on the digital network of the digital substation, simplifies the operation of relay protection algorithms. Calculations have shown that the measurement errors of synchrophasor do not go beyond the specified parameters. The proposed methods of precomputation allow to speed up the work of relay protection algorithms.

Keywords: synchronized vector measurements; digital substation; sampled values; SV; TVE; relay protection.

For citation: Mustafin RG, Kasimov VA. Use of synchronized vector measurements technology for perform relay protection functions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 110-123. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-110-123.

Введение (Introduction)

История техники РЗА насчитывает более сотни лет, но ее изменения и развитие продолжается весьма бурно. Первые электромеханические реле совмещали в себе все функции: измерение, сравнение с уставкой, исполнительный механизм. Микропроцессорные терминалы РЗА уже содержат лишь часть измерительных функций: высоковольтные измерительные трансформаторы выдают вторичный ток, напряжение, само измерение происходит в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) терминала РЗА. В цифровой подстанции МЭК 61850 АЦП уже вынесено в *Merging Unit*, либо в оптический цифровой измерительный трансформатор, терминал РЗА полностью лишился аналоговой обработки сигнала, терминал РЗА содержит лишь программную часть. В результате появилась возможность собрать все программы всех терминалов РЗА в одном месте, в центральном сервере РЗА (ЦРЗА), сам сервер будет связан с цифровой сетью ЦПС оптическими кабелями *Ethernet* [1–3].

Вычислительную сложность для ЦРЗА создаёт дискретное преобразование Фурье (ДПФ), с помощью которого из измеренных точек тока или напряжения, определяется амплитуда первой и высших гармоник, необходимых для работы РЗА. Например, в одном присоединении измерены 4 тока (фазные токи I_A, I_B, I_C и ток нулевой последовательности I_0) и 4 напряжения (фазные напряжения U_A, U_B, U_C и напряжение нулевой последовательности U_0). Таким образом, для одного присоединения необходимо вычислить ДПФ восемь раз. Обычно на подстанции несколько контролируемых присоединений, и это создает пропорционально большую вычислительную сложность для ЦРЗА.

В последние годы появилась технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) [4–6], и активно обсуждается применение СВИ в устройствах релейной защиты (РЗ), становясь в один ряд предлагаемых новых технических методов автоматизации и диагностики сетей [7-9]. Например, в [10, 11] рассматриваются вопросы совершенствования дистанционной защиты на основе технологии синхронизированных векторных измерений.

Применение СВИ в релейной защите решает проблему вычислительной сложности ДПФ для ЦРЗА, поскольку СВИ уже содержит в готовом виде амплитуду и фазу токов и напряжений: каждый пакет *Ethernet* СВИ содержит амплитуды фазных токов I_A, I_B, I_C и тока нулевой последовательности I_0 , амплитуды фазных напряжений U_A, U_B, U_C и напряжение нулевой последовательности U_0 , измеренное значение частоты для каждого из этих сигналов, и некоторые другие данные. Проблемой, которую необходимо

решить для успешного применения СВИ в релейной защите, является то, что измерения СВИ выполняются, считая частоту сигналов, равной номинальной частоте промышленной сети – 50 Гц, в то же время РЗА должны корректно работать при изменении частоты сети в пределах допустимых отклонений $\pm 10\%$ от номинальной частоты (45–55 Гц).

Кроме того, сигналы СВИ не содержат сведений о высших гармониках токов и напряжений, необходимых для работы алгоритмов релейной защиты. Чаще всего в РЗА используются вторая и третья гармоники, но и сумма амплитуд всех (вычисленных) высших гармоник также используется в РЗА.

Устройства измерения СВИ (УСВИ) на подстанции решает три задачи:

- передача СВИ на верхний диспетчерский уровень, для системы мониторинга переходных режимов (СМПР),
- измерения тока и напряжения для работы системы релейной защиты и автоматики подстанции,

- измерение тока и напряжения для счетчиков электроэнергии.

Каждая задача предъявляет свои требования к сигналам СВИ:

- СВИ для СМПР производит расчет параметров режима сети по основной, первой гармонике, таким образом, реальные токи и напряжения представляются чистой косинусоидой с заданной амплитудой, фазой и частотой $f_0=50$ Гц,

- Релейные защиты в основном используют составляющие тока и напряжения первой гармоники, для обнаружения переходных режимов используются высшие гармоники, при совместной работе подстанции с сигналами СВИ и обычной подстанции требуется максимальное приближение фазы СВИ к реальной фазе тока и напряжения, необходимая точность измерений токов и напряжений порядка 1%, точность измерения частоты порядка 0,01 Гц.

- Счетчики электроэнергии требуют измерения активной P и реактивной Q мощностей с более высокой точностью, порядка 0,2%.

Для токовых защит, для которых важна только амплитуда тока, без учета фазы, можно применить как амплитудное значение тока первой гармоники, так и действующее значение тока, так как именно действующее значение точно определяет нагрев оборудования от действия тока.

Дистанционная защита (ДЗ) по току и напряжению короткого замыкания определяет сопротивление петли короткого замыкания и по удельному сопротивлению линии определяет дальность до места короткого замыкания. В качестве удельного сопротивления рассматривается сопротивление прямой последовательности на частоте первой (основной) гармоники. При этом, если токи и напряжения прямой последовательности на первой гармонике образуют симметричную систему векторов со сдвигами фаз в 120° , то токи и напряжения третьей гармоники образуют параллельную систему векторов, то есть составляют нулевую последовательность. В результате, если для первой гармоники можно рассматривать удельное сопротивление прямой последовательности, то уже для третьей гармоники необходимо использовать сопротивление нулевой последовательности. Таким образом, для ДЗ должны использоваться только составляющие тока и напряжения на основной первой гармонике.

Для продольных дифференциальных защит линий электропередачи, например для дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) или дифференциальной защиты линии (ДЗЛ), в которых напрямую используется фаза тока, необходимо в СВИ использовать фазу тока на основной первой гармонике. Если же использовать фазу тока на частоте 50 Гц, то в измерениях фазы появятся периодические колебания с периодом, определяющимся разностью частот рабочей f_p и номинальной $f_0 = 50$ Гц. Если с одной стороны ЛЭП будет установлена ДФЗ с использованием классического СВИ, а с другой стороны – обычная ДФЗ, то разность фаз СВИ и реального тока будет также периодически колебаться, что приведет к ложному срабатыванию защиты.

В соответствии с данными задачами предлагается дополнить алгоритм работы УСВИ на подстанции:

1. Формируются необходимые сигналы для СМПР по преобразованию Фурье с опорной частотой $f_0 = 50$ Гц, одновременно определяется рабочая основная (первая гармоника) частота токов и напряжений f_p .

2. Дополнительно формируются необходимые сигналы для РЗА с помощью преобразования Фурье с опорной частотой f_p , подсчитываются соответствующие амплитуды и фазы высших гармоник. Т.е. фактически работа, выполняемая терминалами РЗА, по обработке аналоговых сигналов переносится на УСВИ.

При использовании классических СВИ для РЗА в широком диапазоне частот (45-55 Гц) сигналов появляются ошибки измерения [12]. Для преодоления данной проблемы предлагаются различные алгоритмы. Несколько уменьшить ошибки при не номинальной частоте сигнала позволяет центрированное вычисление СВИ классического алгоритма с одним периодом и N выборками за период [13].

Основной эффект в уменьшении ошибки дает вычисление СВИ с измеренной частотой сигнала, которая, как правило, отлична от номинальной частоты. При этом возникает проблема с частотой дискретизации $f_{\text{дискр}} = 1/\Delta t = N \cdot f_0$, поскольку измерения тока или напряжения происходят в ожидании, что частота сигнала точно равна номинальной частоте 50 Гц. Для других частот сигналов возможен подсчет с другим количеством точек (другим N) за период и пересчет измеренных точек с интерполяцией и вычислением мгновенной амплитуды сигнала между двумя измеренными значениями [14–16].

В работе проведено комплексное исследование предложенных ранее идей [12-16], их применимости для получения синхронных векторных измерений, пригодных для целей релейной защиты и автоматики, получения необходимой точности вычисления СВИ при отклонении рабочей частоты токов и напряжений от номинальной 50 Гц при наличии в токах и напряжениях высших гармоник.

Для оценки применимости сигналов СВИ для задач РЗА в данной работе проведены стационарные тесты влияния на TVE изменения фазы и частоты сигнала, а также высших гармоник. Исследования проводились путем моделирования теоретического сигнала с последующим измерением СВИ и расчетом ошибок TVE определения СВИ. При этом оценивались следующие ошибки:

- 1) расчета СВИ на номинальной частоте при изменении начальной фазы и рабочей частоты;
- 2) расчета центрированного СВИ на номинальной частоте при изменении начальной фазы и рабочей частоты;
- 3) расчета центрированного СВИ на рабочей частоте при изменении начальной фазы, рабочей частоты и при наличии высших гармоник;
- 4) расчета активной, реактивной и вектора полной мощностей для первой гармоники и суммарного сигнала при изменении разности фаз между напряжением и током, рабочей частоты и при наличии высших гармоник.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе фазные напряжения и токи представляются в виде обобщенной функции:

$$X(t) = X_m \cos(2\pi f t + \varphi), \quad (1)$$

где X_m — амплитуда сигнала, φ — начальная фаза.

Для оценки точности определения СВИ используется метрика TVE (Total vector error), вычисляемая как:

$$TVE = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r - X_r)^2 + (\hat{X}_i - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где \hat{X} — оценка СВИ, полученная в результате ДПФ, X — теоретический вектор.

Расчет СВИ по значениям SV осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье (3) и центрированного ДПФ (4):

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (3)$$

$$X(n) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x(k) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (4)$$

Для обоих вариантов ДПФ определяемая амплитуда сигнала одинакова, но изменяется начальная фаза, т.к. изменяется момент времени, для которого она определяется: в первом случае (3) для первой измеренной точки, а во втором (4) — для центральной точки.

Рассмотрим порядок Фурье преобразования на рабочей частоте f_p токов и напряжений, при постоянной частоте дискретизации АЦП УСВИ, настроенный на опорную частоту $f_0 = 50$ Гц. Пусть за период $T_0 = 1/f_0$ АЦП производит $N_0 = 80$

измерений токов и напряжений через интервал $\Delta t_0 = T_0/N_0$. Тогда для вычисления амплитуды сигнала на частоте f_p потребуется другой период интегрирования, отличный от T_0 . Это можно реализовать изменением числа точек в вычислении Фурье преобразования, но за счет дискретности числа точек N возможно только дискретно изменять период интегрирования и опорную частоту f (Табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Изменение опорной частоты f ДЦФ при изменении числа отсчетов N измеренного сигнала
Change of the reference frequency f DFF when the number of counts N of the measured signal changes

| N | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f , Гц | 54,795 | 54,054 | 53,333 | 52,632 | 51,948 | 51,282 | 50,633 | 50 | 49,383 | 48,780 | 48,193 | 47,619 | 47,059 | 46,512 | 45,977 | 45,455 | 44,944 |

Для точной подстройки периода интегрирования и опорной частоты f Фурье преобразования под частоту f_p потребуется искусственно, математически изменить частоту дискретизации, путем линейной интерполяции мгновенных значений между двумя соседними измеренными АЦП точками. Рассмотрим алгоритмы подсчета новых мгновенных значений $x_{p,i}$, которые необходимы для Фурье преобразования с новой опорой частотой f_p :

- Выбирается ближайшее меньшее число точек N_p по ближайшей большей к f_p частоте из Табл.1, где возможный диапазон частот f_p ограничен рабочим интервалом УСВИ (45–55 Гц).

- Вычисляется необходимый шаг дискретизации:

$$\Delta t_p = 1/(f_p \cdot N_p) \quad (5)$$

- Находится центр среди N_p точек x_i , которыми могут быть исходные мгновенные значения токов и напряжений.

- Для нечетного количества N_p это центральная среди N_p точек $[x_{-(N_p-1)/2} \dots x_{(N_p-1)/2}]$ точка x_0 с индексом $i = 0$, измеренная в момент времени t_0 , и относительно t_0 пересчитывается мгновенное значение x_i в $x_{p,i}$. Тогда все амплитуды и фазы для РЗА будут рассчитываться относительно момента времени t_0 , когда была измерена точка x_0 :

$$x_{p,i} = (x_{i+1} - x_i) \cdot (\Delta t_p - \Delta t_0) \cdot i/\Delta t_0 + x_i. \quad (6)$$

- Для четного количества N_p центр среди N_p точек $[x_{-(N_p)/2} \dots x_{(N_p)/2}]$ находится между точками x_{-1} и x_0 , соответственно момент времени t_0 , относительно которого будут рассчитываться амплитуды и фазы, будет в центре между моментами измерения данных двух точек.

$$x_{p,i} = (x_{i+1} - x_i) \cdot (\Delta t_p - \Delta t_0) \cdot (i + 1/2)/\Delta t_0 + x_i. \quad (7)$$

- Получив передискретизированные точки $x_{p,i}$, которые соответствуют частоте f_p , по ним может быть определен вектор X СВИ для РЗА:

$$X = (\sqrt{2}/N_p) \sum_{i=-(N_p-1)/2}^{(N_p-1)/2} x_{p,i} \cdot \exp(-j2\pi f_p \Delta t_p i), \quad (8)$$

где j – мнимая единица.

- Для четных N_p вектор X СВИ для РЗА можно рассчитать, как:

$$X = (\sqrt{2}/N_p) \sum_{i=-N_p/2}^{(N_p/2-1)} x_{p,i} \cdot \exp(-j2\pi f_p \Delta t_p (i + 1/2)). \quad (9)$$

Результаты (Results)

Рассмотрим методику расчета TVE на примере сравнения теоретического сигнала с частотой, отличной от опорной (45 Гц), с рассчитанным с помощью ДПФ СВИ на частоте 50 Гц. На рисунке 1 представлены теоретический аналоговый сигнал, соответствующий ему дискретный сигнал, а также восстановленный сигнал СВИ.

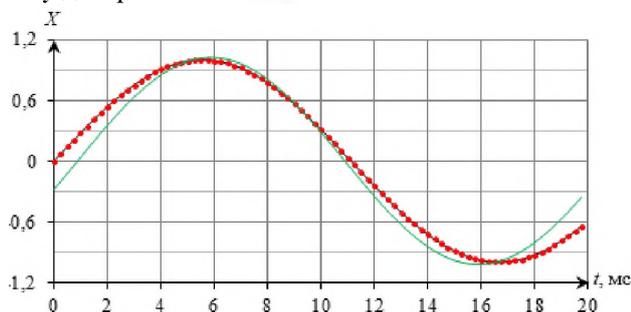


Рис. 1. Теоретический непрерывный сигнал (черная линия) с частотой 45 Гц, соответствующий ему дискретный сигнал (красные маркеры) и восстановленный сигнал с частотой $f_0 = 50$ Гц (зеленая линия), амплитуда и фаза которого определены с помощью ДПФ

Fig. 1. Theoretical continuous signal (black line) with a frequency of 45 Hz, corresponding to it a discrete signal (red markers) and a reduced signal with a frequency of $f_0 = 50$ Hz (green line), the amplitude and phase of which are determined by DPF

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как следует из рисунка 1 амплитуды теоретического и восстановленного из СВИ, рассчитанного на частоте 50 Гц, сигнала примерно равны, но разность фаз этих сигналов для различных моментов времени не постоянна – для начального и конечного моментов времени разность существенна, а для момента времени близкого к центру периода измерения разность практически равна нулю. Это приводит к значительным ошибкам TVE. Результаты расчета TVE СВИ на номинальной частоте при вариации рабочей частоты и начальной фазы теоретического сигнала приведены на рисунке 2.

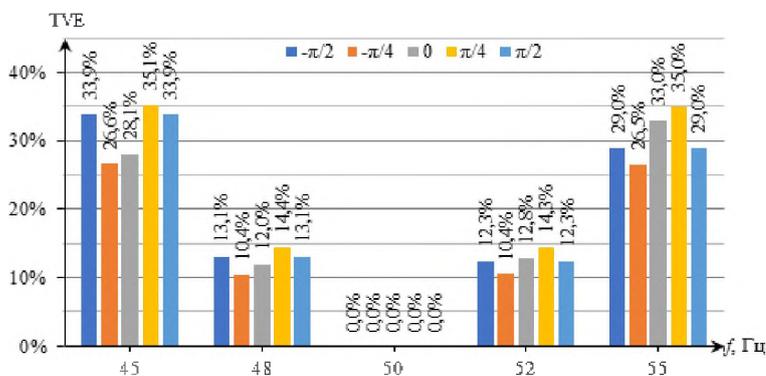


Рис. 2 Диаграмма TVE для различных частот и начальных фаз при расчете СВИ на частоте 50 Гц

Fig. 2 TVE diagram for different frequencies and initial phases when calculating PIS at 50 Hz

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При номинальной частоте сигнала ошибка TVE определения СВИ по SV с помощью ДПФ не превосходит 10^{-6} % для любой начальной фазы. При максимально допустимых отклонениях частоты ошибки TVE достигают 35 %, что значительно превышает допустимые значения ошибок, т.е. полученные СВИ не могут применяться ни для учета мощности, ни для РЗА.

При частоте, отличной от номинальной, ошибки могут быть сокращены за счет определения фазы не для начального момента времени, а для времени центра окна измерения. Однако в связи с тем, что за период выполняется четное количество 80 дискретизаций сигнала, сигнал не может быть отцентрирован точно без интерполяции, поэтому выбирается один из близких к центру отсчетов 39 или 40-й. На рисунке 3 представлены вектора сигналов: теоретического с частотой 45 Гц и рассчитанного СВИ

на частоте 50 Гц.

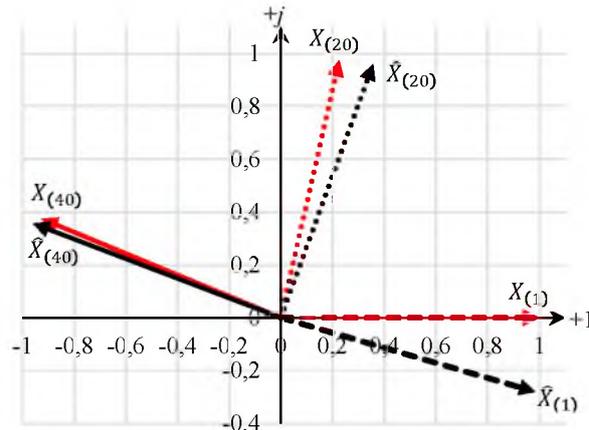


Рис. 3 Вектора теоретического сигнала X и рассчитанного СВИ \hat{X} на частоте 50 Гц для моментов времени, соответствующих 1, 20 и 40-му отсчетам сигнала

Fig. 3 Vector of theoretical signal X and calculated SWIX at 50 Hz for points of time corresponding to the 1st, 20th and 40th signals

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как видно на рисунке 3, при восстановлении вектора для начального момента времени восстановленный вектор отстает от теоретического на угол более 15 градусов. Для момента времени, соответствующего 20 отсчету сигнала, отставание вектора сокращается примерно до 5 градусов. И для центрального момента времени, соответствующего 40 отсчету сигнала, восстановленный вектор начинает опережать теоретический и отклонение составляет примерно 1 градус. Для последующих моментов времени угол опережения продолжает увеличиваться. В векторном представлении данная закономерность может быть объяснена тем, что угловые скорости теоретического вектора и восстановленного СВИ отличаются и пропорциональны их частотам.

На рисунке 4 представлены ошибки TVE для различных частот и начальных фаз теоретического сигнала при расчете фазы СВИ для центрального отсчета времени.

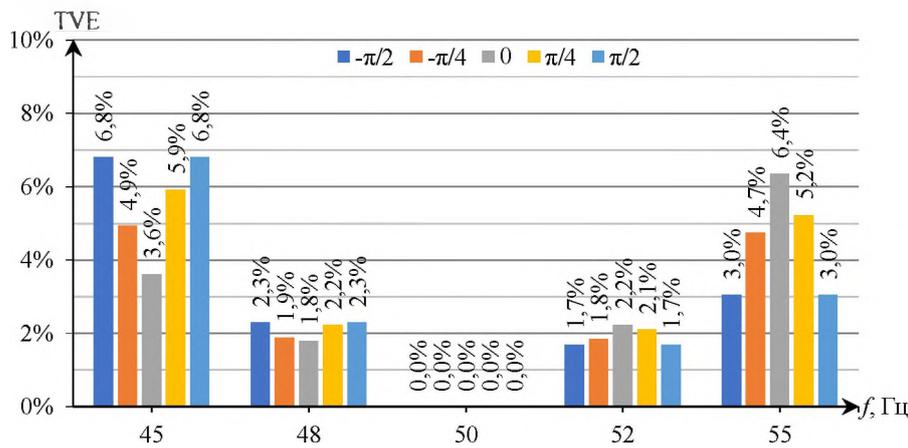


Рис. 4 Диаграмма TVE для различных частот и начальных фаз при расчете СВИ на частоте 50 Гц для центрального отсчета времени

Fig. 4 TVE diagram for different frequencies and initial phases PIS at 50 Hz for central time reference

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4, определение параметров (амплитуды и фазы) сигнала не для начального момента времени, а для центрального отсчета времени позволяет сократить ошибки TVE до 7% и менее. Однако данные ошибки все еще не допустимы для задач учета мощности и РЗА.

Таким образом, при выполнении расчета СВИ на номинальной частоте не удастся добиться необходимой точности при допустимых отклонениях частоты от номинальной, а значит необходимо учитывать изменение частоты сигнала при расчете СВИ.

СВИ на рабочей частоте

Расчет СВИ (амплитуды и фазы) осуществляется с помощью ДПФ, при этом частоты спектральных составляющих сигнала определяются частотой дискретизации и количеством отсчетов $f = f_{\text{дискр}} / (1 \cdot N / 2)$, а их периоды должны быть кратны периоду дискретизации $T = (2 \cdot N) \cdot T_{\text{дискр}}$. В связи с этим для определения параметров сигналов на рабочей частоте можно либо изменять количество анализируемых отсчетов сигнала, либо изменять частоту дискретизации, либо изменять оба параметра.

В первом варианте изменение числа отсчетов может производиться дискретно только на целое количество, соответственно частота первой гармоники будет меняться также дискретно. При этом максимальная ошибка определения частоты составит $\pm 0,37$ Гц при рабочей частоте 54,4245 Гц (табл. 1). На рисунке 5 представлены максимальные ошибки TVE СВИ (для первого варианта) при вариации начальных фаз теоретического сигнала для различных рабочих частот от 45 до 55 Гц.

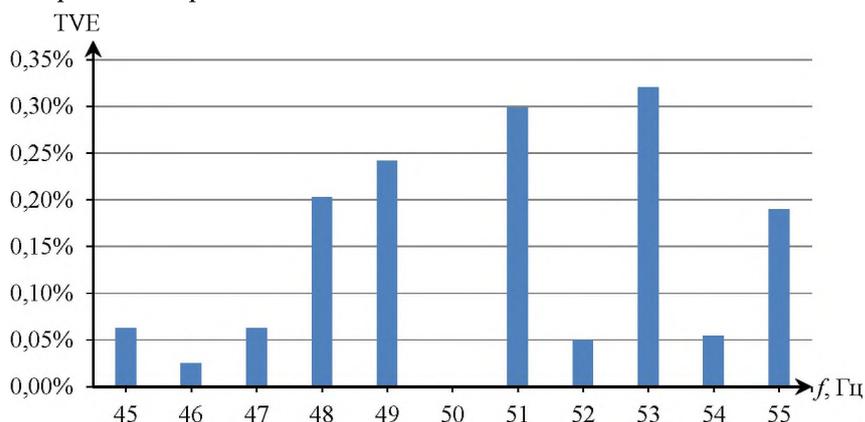


Рис. 5. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при изменении числа анализируемых отсчетов теоретического сигнала

Fig. 5. TVE errors when calculating SWI at operating frequency when the number of analyzed readings of theoretical signal changes

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Изменение количества отсчетов, используемых при ДПФ, в зависимости от реальной частоты сети позволяет сократить ошибки TVE до 0,32%, что уже удовлетворяет требованиям точности для РЗА (< 1%).

Рассмотрим второй подход учета реальной частоты сети – передискретизация (*resampling*) дискретного сигнала ($f_{\text{дискр}} = 80 \cdot f_0$) до частоты $f_{\text{дискр}} = 80 \cdot f_p$. При подобной процедуре число отсчетов сохраняется, но плавно изменяется частота дискретизации, что позволит более точно (по сравнению с первым вариантом) подстроиться под частоту реального сигнала.

На рисунке 6 представлены результаты расчета TVE при передискретизации сигналов с частотами от 45 до 55 Гц.

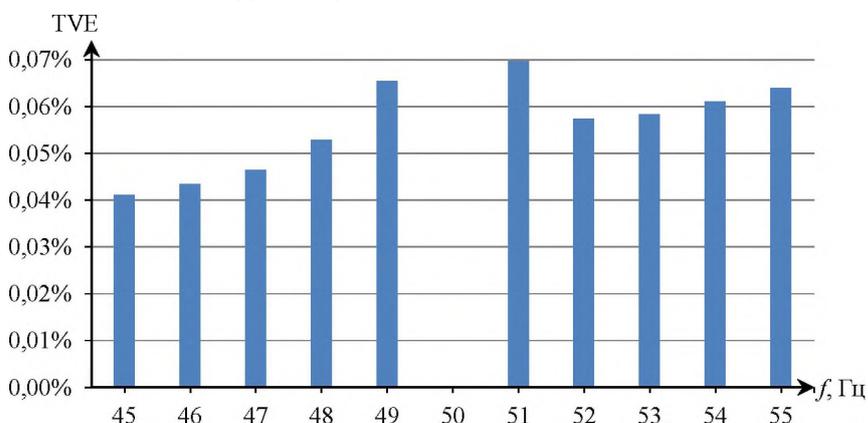


Рис. 6. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при передискретизации теоретического сигнала

Fig. 6. Errors of TVE in calculation of SWI on the operating frequency during re-sampling of theoretical signal

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Учет реальной частоты сети за счет передискретизации сигнала дает меньшие ошибки, чем при изменении числа отсчетов сигнала. Величина ошибок имеет допустимые значения как для задач учета мощности, так и для защит.

Третий подход для учета рабочей частоты включает в себя как подбор количества отсчетов N_p по табл.1, так и передискретизацию сигнала на частоте равной $f_{\text{дискр}} = N_p \cdot f_p$. При этом ДПФ каждый раз будет выполняться для различного количества точек, например, для частоты 55 Гц получим $N_p = 73$ и $f_{\text{дискр}} = 4015$ Гц, а для частоты сигнала 45 Гц – $N_p = 89$ и $f_{\text{дискр}} = 4005$ Гц. Получаемые при таком подходе ошибки TVE представлены на рисунке 7 и составляют менее 0,04%.

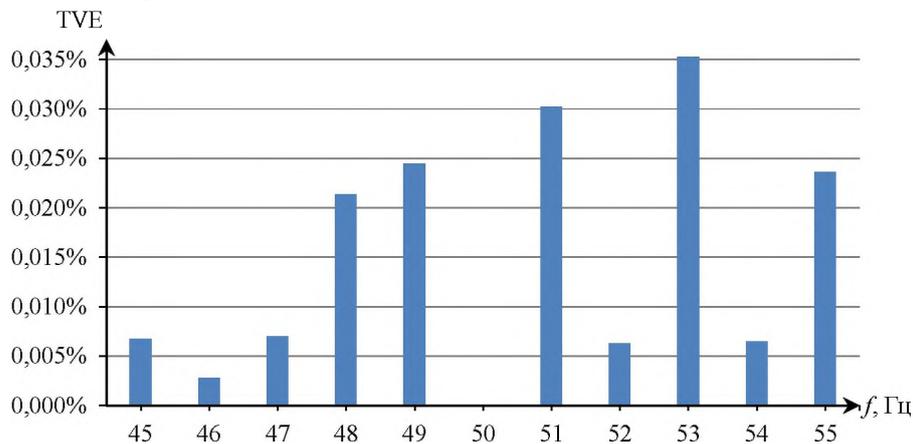


Рис. 7. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте при передискретизации теоретического сигнала с подбором числа отсчетов

Fig. 7. Errors of TVE in calculation of SWI on the operating frequency during re-calibration of the theoretical signal with the selection of the number of counts

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Таким образом, при известной частоте сети удастся добиться снижения ошибки TVE до менее 0,04% во всем допустимом диапазоне частот, при этом начальная фаза теоретического сигнала практически не влияет на величину ошибок.

СВИ при наличии высших гармоник

Было выполнено исследование влияния высших гармоник на ошибки TVE определения СВИ, с подбором количества отсчетов и передискретизацией. К исходному теоретическому сигналу основной гармоники была добавлена вторая гармоника с частотой $2f_p$ и амплитудой $X_{m2} = X_{m1} \cdot 10\%$. Затем были рассчитаны ошибки TVE определения вектора основной X_1 и второй X_2 гармоник, результаты представлены на рисунке 8.

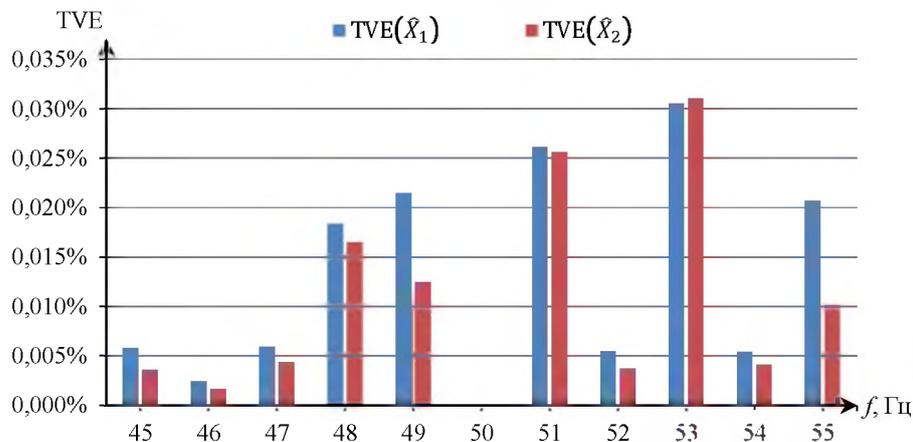


Рис. 8. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте для первой и второй гармоник

Fig. 8. TVE errors when calculating SWI on the working frequency for the first and second harmonics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Значение TVE для первой гармоники осталось в пределах 0,04%. TVE второй гармоники также находится в диапазоне до 0,04%. т.е. СВИ применимы для РЗА.

В ходе дальнейших испытаний в сигнал была добавлена еще и 3-я гармоника с частотой $3f_p$, амплитудой $X_{m3} = X_{m1} \cdot 10\%$. Результаты расчета ошибок TVE определения СВИ основной X_1 , второй X_2 и третьей X_3 гармоник представлены на рисунке 9.

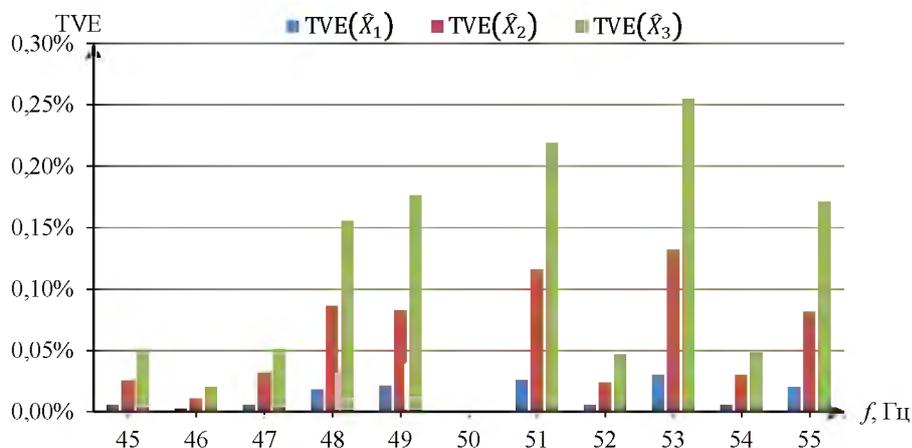


Рис. 9. Ошибки TVE при расчете СВИ на рабочей частоте для первых трех гармоник

Fig. 9. TVE errors when calculating SWI on the working frequency for the first three harmonics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При включении третьей гармоники значения TVE для первой гармоники практически не изменились, значения TVE второй гармоники увеличились до 0,13%, для третьей гармоники TVE достигли 0,25%, т.е. результаты допустимы для РЗА.

ДПФ при расчете мощности

В заключительной серии испытаний анализировались ошибки TVE определения активной, реактивной и вектора полной мощности первой гармоники и суммы трех гармоник (амплитуды напряжения и тока второй и третьей гармоники составляли по 10 % от амплитуд первой), результаты расчетов представлены на рисунках 10 и 11. Полученные ошибки не превосходят допустимых значений, т.е. определение мощностей первой гармоники с помощью ДПФ может применяться для РЗА, а определение мощностей суммарного сигнала может применяться для задач учета мощности.

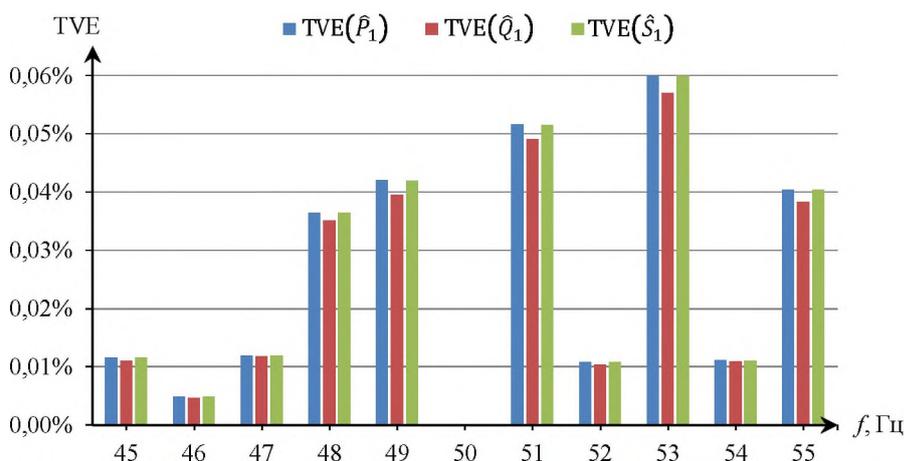


Рис. 10. Ошибки TVE при расчете на рабочей частоте активной и реактивной мощностей, а также вектора полной мощности для первой гармоники при наличии второй и третьей гармоники в сигнале

Fig. 10. TVE errors when calculating the active and reactive power at the operating frequency, as well as the full power vector for the first harmonic when there is a second and third harmonic in the signal

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

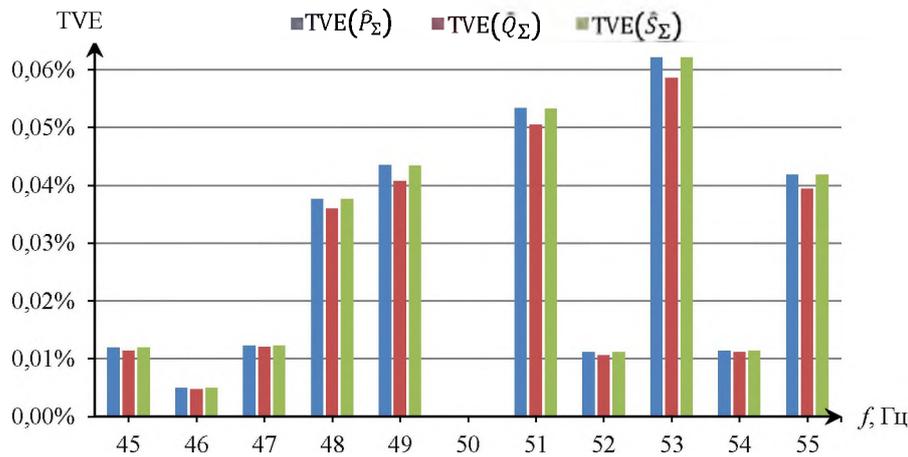


Рис. 11. Ошибки TVE при расчете на рабочей частоте активной и реактивной мощностей, а также вектора полной мощности сигнала, содержащего первые три гармоники
 Fig. 11. TVE errors when calculating on the operating frequency of active and reactive capacities, as well as the vector of the full power of the signal containing the first three harmonics
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Предвычисления РЗА

При реализации ЦПС четвертого типа алгоритмы РЗА должны реализовываться на центральном сервере ЦРЗА. Например, алгоритм работы токовой отсечки без выдержки времени фазы A (с измеренным током фазы I_A и уставкой защиты $I_{уставки}$) будет состоять всего из одной строки кода¹: «If ($I_A > I_{уставки}$) then TRIP». Этот алгоритм достаточно прост и не сильно нагружает вычислительные ресурсы сервера ЦРЗА.

Алгоритмы дистанционной защиты несколько сложнее, так как выделяется несколько зон срабатывания в двумерной плоскости активного R и реактивного X сопротивлений. Границы этих зон срабатывания достаточно сложны. При этом необходимо определить, в какую зону дистанционной защиты попало измеренное значение сопротивления ($R_{ИЗМ}$, $X_{ИЗМ}$) петли короткого замыкания. Этот алгоритм может быть упрощен при использовании так называемых «предвычислений»: заранее, на этапе конфигурирования и настройки терминала РЗА, вся плоскость (R , X) с учетом требований точности разбивается с шагом (ΔR , ΔX) на элементарные прямоугольные области. Для каждой элементарной прямоугольной области сопротивлений определяется в какую зону срабатывания защиты она попадает. Таким образом, за счет предвычислений осуществляется переход от непрерывной плоскости (R , X) к дискретной таблице T , состоящей из конечного количества ячеек, в которых содержится номер зоны срабатывания защиты для каждой элементарной области плоскости (R , X). Тогда для реализации алгоритма дистанционной защиты при измерении сопротивлений $R_{ИЗМ}$ и $X_{ИЗМ}$ необходимо определить номер строки $N = R_{ИЗМ} / \Delta R$ и столбца $M = X_{ИЗМ} / \Delta X$ и из соответствующей ячейки таблицы T извлечь номер зоны срабатывания.

Перенос обработки аналоговых сигналов с устройств РЗА ближе к измерительным устройствам (оптические цифровые измерительные трансформаторы, analog merging unit AMU, УСВИ), применение предварительной обработки сложных уставок РЗА («предвычисления») – все это значительно уменьшает вычислительную сложность работы устройств РЗА, позволяя собрать все необходимые защиты и алгоритмы автоматики в одном устройстве – в центральном сервере релейной защиты и автоматики, тем самым реализовав четвертый тип ЦПС.

Заключение (Conclusions)

В работе исследована возможность применения для ЦРЗА сигналов СВИ в качестве альтернативы сигналам SV. Установлено, что классические сигналы СВИ, измеряемые на номинальной частоте для нужд СМПП, не могут применяться для РЗА и необходимо измерять СВИ на реальной частоте. Предложена методика расчета СВИ на реальной частоте с помощью ДПФ, определены возникающие при этом ошибки TVE для сигналов с частотой, отличной от номинальной, при наличии и отсутствии высших

¹ Строка «If ($I_A > I_{уставки}$) then TRIP» означает следующее: «Если (If) измеренный ток (I_A) больше уставки защиты ($I_{уставки}$) токовой отсечки без выдержки времени, тогда (then) сразу подается команда отключения выключателя (TRIP), и выключатель отключает участок сети с коротким замыканием, таким образом защищая оборудование сети от повреждений большим током короткого замыкания.

гармоник. Показано, что СВИ, рассчитанные на реальной частоте с помощью ДПФ, могут применяться для задач РЗА и учета мощности на ЦПС четвертого типа. Использование сигналов СВИ для РЗА снизит нагрузку на цифровую сеть ЦПС и упростит реализацию централизованной РЗА на ЦПС. Предложена методика предвычислений для РЗ, позволяющая дополнительно сократить нагрузку на сервер ЦРЗА.

Следует отметить, что определенная в СВИ фаза (привязанная уже к центру интервала интегрирования при вычислениях) становится максимально приближенной к фазе реальных токов и напряжений, соответственно такая ЦПС может работать в связке с обычными подстанциями; также централизованное вычисление СВИ добавляет задержку в срабатывании релейной защиты от половины до одного периода первой гармоники рабочей частоты, однако и микропроцессорные терминалы РЗА затрачивают схожее время для подсчета амплитуды и фазы токов и напряжений.

Литература

1. Ferrer, H.J.A. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / H.J.A. Ferrer, III E.O. Schweitzer. – Pullman, SEL, 2010. – 397 p.
2. 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. 2020. Т. 12. № 3 (47). С. 92-100.
3. Жуков А.В., Дубинин Д.М., Расщепляев А.И., Харламов В.А. Опыт организации коммуникационных сетей передачи данных СВИ в системах мониторинга и управления // Энергетик. 2021. № 6. С. 3-8.
2. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the efficiency and reliability of relay protection and automation equipment for digital substations and digital distribution electronics // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2020. Vol. 12. No. 3 (47). pp. 92-100.
3. A.V. Zhukov, D.M. Dubinin, A.I. Rasscheplyayev, and V.A. Kharlamov, Russ. Experience in organizing communication networks for data transmission of SMI in monitoring and control systems // Energetik. 2021. No. 6. S. 3-8.
4. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications. A White Paper by the NASPI Distribution Task Team, NASPI-2018-TR-001, January 2018, 62 p.
5. Фадке А.Г., Торп Д.С. Синхронизированные векторные измерения и их применение. М.: Техносфера. – 2021. – 320 с.
6. Paramo, G.; Bretas, A.; Meyn, S. Research Trends and Applications of PMUs. Energies 2022, 15, 5329
7. Kasimov, V.A. Digital processing of location monitoring reflectograms of overhead transmission lines // International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 8(5), pp. 2231–2238.
8. Minullin, R.G., Piskovatskiy, Y.V., Kasimov, V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 kV Distribution Circuits by a Location Method // Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, 2020, pp. 411–415
9. Минуллин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Касимов В.А., Мустафин Р.Г., Виноградов В.Ю. Определение места повреждения локационным методом на линиях электропередачи с ответвлениями // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 3 (51). С. 69-80.
10. Ivankovic I., Brnobic D. Distance Protection Based on the Synchrophasor Data in Control Room // Proceedings 9th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 21-23 April 2021. – Istanbul.
11. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционной защиты // Релейная защита и автоматизация. 03, сентябрь 2022, с.12-17.
12. Максимов Б.К. и др. Синхронизированные векторные измерители параметров режима электроэнергетических систем в различных условиях работы // Максимов Б.К., Климова Т.Г., Жуков А.В., Дубинин Д.М. Электричество, 2018, No 6, с. 16–23. DOI:10.24160/0013 5380 2018 6 16 23.
13. Mark Adamiak, William Premerlani, Dr. Bogdan Kasztenny. Synchrophasors:

Definition, Measurement, and Application // [gegridsolutions.com](https://www.gegridsolutions.com), <https://www.gegridsolutions.com>, p.57-62.

14. Jain et al. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT // Jain, V.K., Collins, W.L. and Davis, D.C. (1979), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 28, No. 2, pp.113–122.

15. Romano, P. and Paolone, M. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (2014) Vol. 63, No. 12, pp.2824–2836.

16. Khettaoui, B. and Boudour, M. Synchrophasor estimation using the three-point interpolated DFT based on polynomial approximation // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), (2018) Algiers, Algeria, pp.1–5.

Авторы публикации

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета.

Касимов Василь Амирович – д-р техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Ferrer H.J.A. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. H.J.A. Ferrer, III E.O. Schweitzer. Pullman, SEL, 2010. 397 p.

2. Mokeev AV, Piskunov SA, Ulyanov DN, et al. Improving the efficiency and reliability of relay protection and automation equipment for digital substations and digital distribution electronics. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020;12;3(47):92-100.

3. Zhukov AV, Dubinin DM, Rassheplyaev AI., Experience in organizing communication networks for data transmission of SMI in monitoring and control systems. *Energetik*. 2021;6:3-8.

4. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications. *A White Paper by the NASPI Distribution Task Team*, NASPI-2018-TR-001, January 2018, 62 p.

5. Fadke AG, Thorp DS. Synchronized vector measurements and their application. Moscow: Technosphere. 2021. 320 p.

6. Paramo, G, Bretas, A, Meyn S. *Research Trends and Applications of PMUs*. *Energies* 2022;15;5329

7. Kasimov VA. Digital processing of location monitoring reflectograms of overhead transmission lines. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019;8(5):2231–2238.

8. Minullin RG, Piskovatskiy YV, Kasimov, V.A. *Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 kV Distribution Circuits by a Location Method*. Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, pp. 411–415

9. Minullin RG, Piskovatskiy YuV, Kasimov VA, et al. Determining the location of damage by the location method on power lines with branches. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2021;13;3 (51):69-80.

10. Ivankovic I, Brnobic D. *Distance Protection Based on the Synchrophasor Data in Control Room*. Proceedings 9th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 21-23 April 2021. Istanbul.

11. Mokeev AV, Piskunov SA. Application of synchronized vector measurement technology to improve distance protection. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 03 September 2022, Pp.12-17.

12. Maksimov BK. et al. *Synchronized vector meters of the mode parameters of electric power systems in various operating conditions*. Maksimov B.K., Klimova T.G., Zhukov A.V., Dubinin D.M. *Elektrichestvo*, 2018;6:16–23. doi:10.24160/0013 5380 2018 6 16 23.

13. Mark Adamiak, William Premerlani, Dr. Bogdan Kasztenny. *Synchrophasors: Definition, Measurement, and Application*. [gegridsolutions.com](https://www.gegridsolutions.com). <https://www.gegridsolutions.com>, p.57-62.

14. Jain et al. *High-accuracy analog measurements via interpolated FFT*. Jain, V.K., Collins, W.L. and Davis, D.C. (1979), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1997;28(2):113–122.

15. Romano, P. and Paolone, M. *Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (2014);63:12:2824–2836.

16. Khettaoui, B. and Boudour, M. *Synchrophasor estimation using the three-point interpolated DFT based on polynomial approximation*. International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), (2018) Algiers, Algeria, pp.1–5.

Authors of the publication

Ramil G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasil A. Kasimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено

21.02.2023г.

Отредактировано

06.03.2023г.

Принято

20.03.2023г.