

DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-160-170

УДК 621.311

ББК 31.221

Д.А. ФЕДОТОВ, А.В. БЫЧКОВ, Н.А. ДОНИ, О.В. ДМИТРИЕВ

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СИНХРОВЕКТОРА В УСТРОЙСТВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ Р-КЛАССА

**Ключевые слова:** устройство синхронизированных векторных измерений, синхронизированные векторные измерения, цифровая обработка сигналов, фильтр Фурье, ортогональные составляющие.

В распределенных системах релейной защиты и автоматики энергосистем предполагается широкое применение устройств синхронизированных векторных измерений Р-класса. Точность векторных измерений подвержена влиянию изменения частоты сигналов энергосистемы, присутствия кратных гармоник и особенностей электромеханического переходного процесса. Необходимая точность векторного измерения в этих условиях обеспечивается подобающей цифровой обработкой электрических величин. В настоящей работе рассматриваются теоретические и практические вопросы цифровой обработки сигналов в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса на основе классического фильтра Фурье.

**Целью исследования** является получение алгоритма обработки входного сигнала в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса на основе классического фильтра Фурье, обеспечивающего необходимую точность измерения.

**Материалы и методы.** При выполнении работы руководствовались действующим нормативным документом. При выполнении работы были использованы методы имитационного и математического моделирования.

**Результаты исследования.** Разработан алгоритм обработки входного сигнала для устройства синхронизированных векторных измерений Р-класса на основе классического фильтра Фурье, обеспечивающий корректное определение синхровектора в статических и динамических режимах.

Полученный алгоритм обработки входного сигнала на основе классического фильтра Фурье представляется возможным использовать при создании устройства синхронизированных векторных измерений Р-класса. Алгоритм, полученный для обработки входного сигнала в УСВИ Р-класса, может быть применен и для реализации устройств М-класса путем усиления фильтрующих свойств.

**Выводы.** Представлен алгоритм определения векторных значений на основе классического фильтра Фурье. Функционирование алгоритма проверено в статических и динамических режимах при помощи имитационного и математического моделирования и показано его соответствие требованиям к точности, предъявляемым к устройствам синхронизированных векторных измерений Р-класса. Предложенный алгоритм может быть применен и для устройств М-класса путем усиления фильтрующих свойств.

В распределенных системах релейной защиты и автоматики энергосистем предполагается широкое применение устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) Р-класса [5, 6, 8, 11]. Точность векторных измерений подвержена влиянию изменения частоты, присутствия кратных гармоник и особенностей электромеханического переходного процесса. Необходимая точность векторного измерения в этих условиях обеспечивается подобающей цифровой обработкой электрических величин.

Для представления сигнала в виде векторного измерения обычно используется фильтр Фурье [9, 10]. Существуют различные модификации фильтра Фурье [2–4].

В настоящей работе рассматриваются теоретические и практические вопросы цифровой обработки сигналов в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса на основе классического фильтра Фурье с прямоугольной оконной функцией в один период основной гармоники. Как известно, прямоугольную оконную функцию можно рассматривать как фильтр скользящего среднего.

**Целью исследования** является получение алгоритма обработки входного сигнала в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса на основе классического фильтра Фурье, обеспечивающего необходимую точность измерения.

**Материалы и методы.** При выполнении работы руководствовались действующим нормативным документом (ГОСТ Р 59365-2021), который содержит требования к точности синхронизированных векторных измерений. При выполнении работы были использованы методы имитационного и математического моделирования. Имитационное и математическое моделирование выполнено в программе MATLAB.

#### **Результаты исследования**

##### **1. Обработка входного сигнала в УСВИ Р-класса**

**1.1. Анализ классического фильтра Фурье.** Формула определения вектора с помощью классического фильтра Фурье

$$\bar{X}(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} x(i+k)W(i)e^{-j(i+k)T_{\text{sample}}\omega_0},$$

где  $\bar{X}(k)$  – вектор  $k$ -го отсчета;  $N$  – порядок оконной функции;  $x(i+k)$  – отсчеты входного сигнала;  $W(i) = 1$  – коэффициенты прямоугольной оконной функции;  $T_{\text{sample}}$  – период дискретизации;  $\omega_0$  – круговая частота основной гармоники.

Классический фильтр Фурье позволяет без погрешности определять векторное значение входного сигнала номинальной частоты, однако отклонение частоты входного сигнала от номинального приводит к появлению постоянной и переменной составляющих погрешности измерения. В статических режимах точность измерения УСВИ Р-класса нормируется в диапазоне частот 46...52 Гц<sup>1</sup>. В этом случае ортосоставляющие представляют собой сигнал разностной частоты диапазона 0...4 Гц [1]. Вместе с тем они содержат составляющие суммарной частоты диапазона 96...102 Гц [1], приводящие к колебаниям в измерениях.

В случае применения классического фильтра Фурье постоянная составляющая погрешности измерения синхровектора ( $X_{\text{пост}}$ ,  $\varphi_{\text{пост}}$ ) зависит от коэффициента передачи фильтра скользящего среднего ортогональной составляющей разностной частоты (0...4 Гц), а переменная составляющая погрешности

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59365-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Система мониторинга переходных режимов. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.

измерения синхровектора ( $X_{\text{ПЕРЕМ}}$ ,  $\Phi_{\text{ПЕРЕМ}}$ ) – от коэффициента передачи суммарной частоты (96...102 Гц).

Погрешность в измерениях синхровектора возникает при отклонении частоты входного сигнала от номинального значения, достигая максимального значения при частотах на границах нормируемого диапазона для УСВИ. Погрешность УСВИ на частоте 46 Гц больше, чем на частоте 52 Гц. Объясняется это особенностью амплитудно-частотной характеристики фильтра скользящего среднего (кривая 1 рис. 1): коэффициент передачи на граничной частоте изменения ортогональных составляющих 4 Гц (частота входного сигнала 46 Гц) составляет 0,990 против 0,997 при 2 Гц (52 Гц); кроме того, коэффициент передачи ортогональной составляющей суммарной частоты больше и достигает 0,042 при 96 Гц (46 Гц) против 0,020 для 102 Гц (52 Гц).

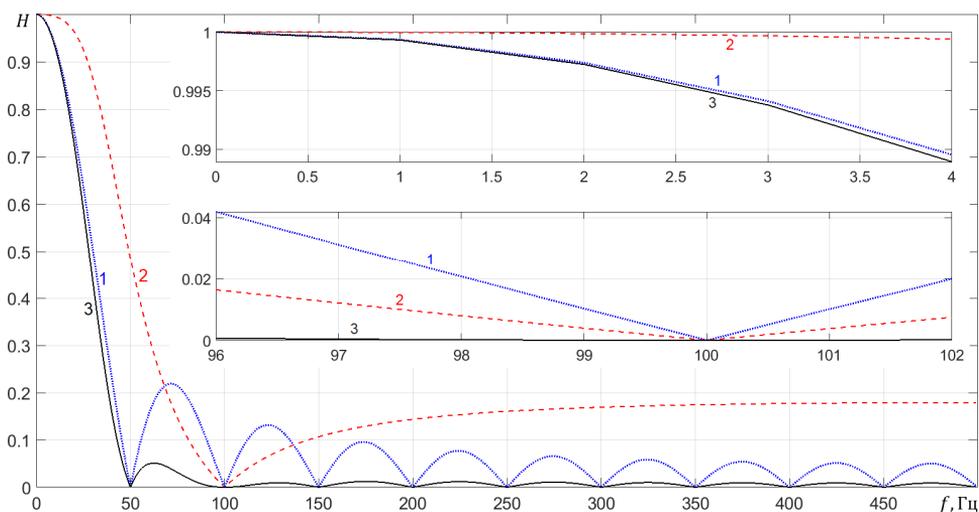


Рис. 1. АЧХ фильтра скользящего среднего 20 порядка (1);  
режекторного БИХ-фильтра 2-го порядка (2);  
фильтра (3), состоящего из фильтра скользящего среднего (1)  
и режекторного БИХ-фильтра (2)

Для учета постоянной составляющей погрешности измерения применяется компенсация величин (амплитуды и фазы) при отклонении частоты входного сигнала от номинального. Тогда погрешность оценки синхровектора зависит только от переменной составляющей.

Тем не менее после компенсации постоянной составляющей погрешности измерения максимальная погрешность по амплитуде составляет 4,2%, а по фазе – 2,4°, как следствие, приводя к суммарной погрешности векторного измерения (TVE) около 6%, что существенно больше нормированного значения (рис. 2).

Классический фильтр Фурье полностью подавляет ортогональные составляющие гармоник, кратных основной частоте (кривая 1 рис. 1). Следовательно, применение классического фильтра Фурье обеспечивает выполнение требований к УСВИ Р-класса в части подавления гармонических составляющих.

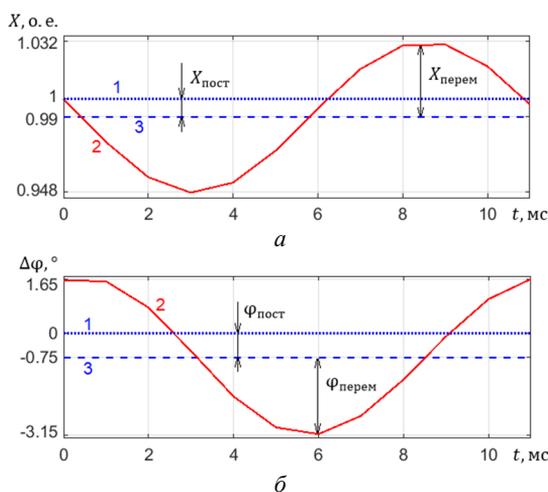


Рис. 2. Оценка амплитуды синхровектора (а) и погрешность фазы синхровектора (б) при частоте входного сигнала 46 Гц: кривые параметров синхровектора входного сигнала (1); синхровектора, определенного классическим фильтром Фурье (2), и его среднего значения (3)

Таким образом, синхровектор, определенный классическим фильтром Фурье, при отклонении частоты входного сигнала от номинального испытывает влияние ортогональной составляющей суммарной частоты, что приводит к появлению в его измерениях переменной составляющей погрешности.

**1.2. Повышение точностных показателей классического фильтра Фурье.** Ввиду того, что синхровектор, определенный классическим фильтром Фурье, при отклонении частоты сети от номинального испытывает влияние ортогональной составляющей суммарной частоты, необходимо усилить фильтрующие свойства фильтра скользящего среднего в указанной области изменения суммарной частоты (96...102 Гц). Для этого возможно применение режекторного фильтра.

В качестве режекторного фильтра можно применить как фильтр с конечной импульсной характеристикой, так и фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Для уменьшения количества математических операций применен режекторный БИХ-фильтр второго порядка, синтезированный на основе требований к подавлению составляющих суммарной частоты [7].

Режекторный БИХ-фильтр применяется последовательно с оконной функцией. Таким образом, коэффициент передачи фильтра, состоящего из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра, представляет собой перемножение коэффициентов передачи каждого из фильтров.

Коэффициент передачи фильтра скользящего среднего ортосоставляющей суммарной частоты для входного сигнала в диапазоне частот 46...52 Гц максимален для 46 Гц (составляющая суммарной частоты 96 Гц) (кривая 1 рис. 1).

При формулировании требований к БИХ-фильтру приняли, что на частоте 96 Гц коэффициент передачи фильтра, состоящего из фильтра скользящего среднего и БИХ-фильтра, должен быть не более 0,001. Выбор такого значения

коэффициента передачи обуславливается тем, что амплитудная погрешность, вносимая сигналом суммарной частоты, должна быть не более 0,1%.

Учитывая, что коэффициент передачи фильтра скользящего среднего сигнала частотой 96 Гц равен 0,042, коэффициент передачи сигнала БИХ-фильтром должен быть не более чем  $0,001 / 0,042 = 0,024$ .

Сформулируем требования для синтеза БИХ-фильтра:

1. Коэффициент передачи сигнала на нулевой частоте должен быть равен 1:  $|H(0)| = 1$ .

2. Коэффициент передачи сигнала в диапазоне частот 96...102 Гц не более 0,024:  $|H(f)| \leq \varepsilon$ , где  $f = 96 \dots 102$  Гц – частота сигнала;  $\varepsilon \leq 0,024$  – требуемый коэффициент передачи сигнала.

Передаточная функция синтезированного режекторного БИХ-фильтра:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0,1644(1 - 1,6180z^{-1} + z^{-2})}{1 - 1,6321z^{-1} + 0,6950z^{-2}}.$$

**1.3. Анализ фильтра, состоящего из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра.** Погрешность в измерениях синхровектора возникает при отклонении частоты входного сигнала от номинального значения, достигая максимального значения при частотах на границах нормируемого диапазона для УСВИ. Погрешность УСВИ на частоте 46 Гц больше, чем на частоте 52 Гц. Объясняется это особенностью амплитудно-частотной характеристики фильтра, состоящего из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра (кривая 3 рис. 1; табл. 1): коэффициент передачи на граничной частоте изменения ортогональных составляющих 4 Гц (частота входного сигнала 46 Гц) составляет 0,989 против 0,997 при 2 Гц (52 Гц); кроме того, коэффициент передачи ортогональной составляющей суммарной частоты больше и достигает 0,00068 при 96 Гц (46 Гц) против 0,00015 для 102 Гц (52 Гц).

Таблица 1

**Коэффициенты передачи амплитуды сигналов фильтром, состоящим из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра**

Разностная частота (по модулю), Гц	Коэффициент передачи
0	1,00000
2	0,99720
4	0,98890
50	0
96	0,00068
100	0
102	0,00015

В то же время на точность измерения в значительной степени влияет сдвиг фазы синхровектора, достигая максимального значения  $2,006^\circ$  при частоте входного сигнала 46 Гц (табл. 2).

Для учета постоянной составляющей погрешности измерения применяется компенсация величин (амплитуды и фазы) при отклонении частоты входного сигнала от номинального.

Таблица 2

Величины сдвига фазы сигналов фильтром, состоящим из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра

Разностная частота, Гц	Сдвиг фазы, °
-4	2,006
-2	0,984
0	0
2	-0,983

## 2. Компенсация амплитуды и фазы синхровектора при отклонении частоты входного сигнала от номинального

На основе коэффициентов передачи амплитуды (табл. 1) и величин сдвига фазы (табл. 2) сигналов фильтром, состоящим из фильтра скользящего среднего и режекторного БИХ-фильтра, путем аппроксимации получены функции компенсации амплитуды ( $X_{\text{КОМП}}(\Delta f)$ ) и фазы синхровектора ( $\varphi_{\text{КОМП}}(\Delta f)$ ) при отклонении частоты входного сигнала от номинального:

$$X_{\text{КОМП}}(\Delta f) = 0,0007\Delta f^2 + 1,0000;$$

$$\varphi_{\text{КОМП}}(\Delta f) = 0,4975\Delta f - 0,0042,$$

где  $\Delta f$  – отклонение частоты входного сигнала от номинального.

Компенсации амплитуды ( $\hat{X}(k)$ ) и фазы ( $\hat{\varphi}(k)$ ) выполняются соответственно по формулам

$$\hat{X}(k) = X(k)X_{\text{КОМП}}(\Delta f);$$

$$\hat{\varphi}(k) = \varphi(k) + \varphi_{\text{КОМП}}(\Delta f),$$

где  $X(k)$  и  $\varphi(k)$  – амплитуда и фаза вычисленного вектора  $k$ -го отсчета соответственно.

Отклонение частоты  $k$ -го отсчета входного сигнала ( $\Delta f(k)$ ) от номинального ( $\Delta f$ ) определяем через вычисление скорости изменения фазы прямой последовательности<sup>1</sup> по формуле

$$\Delta f(k) = \frac{\theta(k+1) - \theta(k-1)}{4\pi\Delta t},$$

где  $\theta(k+1)$  и  $\theta(k-1)$  – фазы векторов прямой последовательности  $(k+1)$ -го и  $(k-1)$ -го отсчетов соответственно.

## 3. Структурная схема алгоритма обработки входного сигнала

Представленный алгоритм обработки входного сигнала (рис. 3) основан на последовательном применении следующих операций:

1) формирование ортогональных составляющих классическим фильтром Фурье;

2) ослабление составляющих суммарной частоты в сигнале векторных измерений БИХ-фильтром 2-го порядка;

3) компенсация ошибки в измерении амплитуды и фазы синхровектора при уходе частоты входного сигнала.

<sup>1</sup> IEC/IEEE 60255-118-1. IEEE/IEC International Standard – Measuring relays and protection equipment. Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.



Рис. 3. Структурная схема алгоритма обработки входного сигнала в УСВИ Р-класса

#### 4. Проверка фильтров в статических и динамических режимах

Тестирование в статических и динамических режимах было проведено согласно ГОСТ Р 59365-2021. Погрешность измерения синхровектора предложенным алгоритмом (рис. 3) не превышает допустимых значений.

В качестве примера приведены значения погрешности измерения синхровектора в статическом режиме: максимальное значение суммарной погрешности векторного измерения (TVE) при уходе частоты равно 0,0771%, погрешности по фазе – 0,0435° (табл. 3). В то время как допустимое значение суммарной погрешности (TVE) не более 1%, погрешности по фазе не более 0,1°.

Таблица 3

Максимальные значения суммарной погрешности векторного измерения (TVE) и погрешности измерения синхровектора по фазе в статических режимах классическим фильтром Фурье с режекторным БИХ-фильтром

Частота входного сигнала, Гц	TVE, %	Погрешность по фазе, °
46	0,0771	0,0435
50	0	0
52	0,0226	0,0128

В качестве примера приведены графики тестирования в динамических режимах (рис. 4 и 5) при скачкообразном изменении амплитуды (на 10%) и фазы (на 10°) входного сигнала.

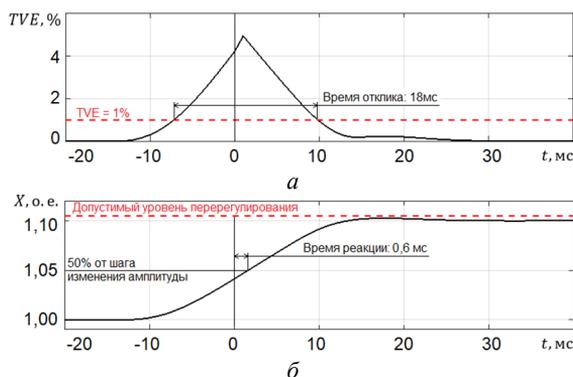


Рис. 4. Суммарная погрешность векторного измерения (TVE) (а) и амплитуда синхровектора (б) при скачкообразном изменении амплитуды входного сигнала в момент времени  $t = 0$  при использовании классического фильтра Фурье с режекторным БИХ-фильтром

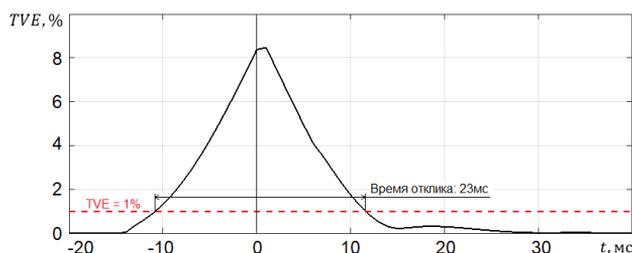


Рис. 5. Суммарная погрешность векторного измерения (TVE) при скачкообразном изменении фазы входного сигнала в момент времени  $t = 0$  при использовании классического фильтра Фурье с режекторным БИХ-фильтром

Время отклика при скачкообразном изменении амплитуды входного сигнала составляет 18 мс при допустимых 40 мс.

Время реакции при скачкообразном изменении амплитуды входного сигнала составляет 0,6 мс. Допустимое значение времени реакции ( $T_{\text{РЕАКЦИИ}}$ ) зависит от частоты выдачи кадров синхронизированных векторных измерений ( $F_s$ ) и определяется формулой<sup>1</sup>:

$$T_{\text{РЕАКЦИИ}} \leq 0,25 / F_s.$$

Допустимое время реакции минимально при максимальной частоте выдачи кадров. Таким образом, при максимальной частоте выдачи кадров синхронизированных векторных измерений, равной 100 кадров/с, допустимое время реакции составляет 2,5 мс. Следовательно, время реакции при скачкообразном изменении амплитуды входного сигнала удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 59365-2021.

Перерегулирование амплитуды при скачкообразном изменении амплитуды входного сигнала составляет 2,5% при допустимых 5%.

Время отклика при скачкообразном изменении фазы входного сигнала составляет 23 мс при допустимых 40 мс.

Полученный алгоритм обработки входного сигнала на основе классического фильтра Фурье представляется возможным использовать при создании УСВИ Р-класса.

Алгоритм, полученный для обработки входного сигнала в УСВИ Р-класса, может быть применен и для реализации устройств М-класса путем усиления фильтрующих свойств.

**Выводы.** В работе представлен алгоритм обработки входного сигнала в УСВИ Р-класса, основанный на последовательном применении следующих операций:

- 1) формирование ортогональных составляющих классическим фильтром Фурье;
- 2) ослабление составляющих суммарной частоты в сигнале векторных измерений БИХ-фильтром 2-го порядка;

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59365-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Система мониторинга переходных режимов. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.

3) компенсация ошибки в измерении амплитуды и фазы при уходе частоты входного сигнала.

Функционирование алгоритма проверено в статических и динамических режимах при помощи имитационного и математического моделирования, показано его соответствие требованиям к точности измерения УСВИ Р-класса.

Алгоритм, предложенный для обработки входного сигнала в УСВИ Р-класса, может быть применен и для устройств М-класса путем усиления фильтрующих свойств.

#### Литература

1. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. 334 с.

2. Климов А.А., Немкович А.С., Ермолаев Г.С. Алгоритм синхронизированных векторных измерений для устройств класса Р с использованием интерполированного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) // Релейщик. 2019. № 1(33). С. 30–31.

3. Климова Т.Г., Ревякин В.А. Возможности применения устройств синхронизированных векторных измерителей в распределительных сетях // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 6(63). С. 110–115.

4. Климова Т.Г., Ревякин В.А. Повышение точности и быстродействия алгоритмов при цифровой обработке сигналов в задачах релейной защиты и автоматики // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 2(51). С. 20–27.

5. Колосок И.Н., Коркина Е.С., Тихонов А.В. Использование синхронизированных векторных измерений при моделировании устройств FACTS в задаче оценивания состояния ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: в 2 кн. (Ташкент, 23–27 сентября 2019 г.) / отв. ред. Н.И. Воропай. Ташкент: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, 2019. Кн. 1. С. 228–237.

6. Лебедев А.А., Климова Т.Г., Дубинин Д.М. Идентификация аварийных ситуаций в электроэнергетической системе по данным УСВИ // Релейщик. 2019. № 1(33). С. 10–16.

7. Мокеев А.В. Синтез БИХ-фильтров на основе спектральных представлений в координатах комплексной частоты // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2009: тез. докл. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: РНТОРЭС, 2009. С. 169–172.

8. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Повышение эффективности дистанционной защиты линии на основе СВВ в условиях переходных процессов и при учете влияния дуги // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 94-го заседания Междунар. научного семинара (Алушта, 19–23 сентября 2022 г.) / отв. редактор В.А. Стенников. Иркутск: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского РАН, 2022. С. 485–494.

9. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов, В.А. Наумов, Н.Г. Иванов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 1(22). С. 17–26.

10. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.В. Мартынов и др. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 324 с.

11. Пискунов С.А., Мокеев А.В. Применение синхронизированных векторных измерений для совершенствования дистанционного принципа работы устройств релейной защиты // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2023» (Чебоксары, 18–21 апреля 2023 г.) / Инновационный электротехнический кластер Чувашской Республики, Академия электротехнических наук Чувашской Республики, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2023. С. 87–90.

---

**ФЕДОТОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ** – аспирант кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет; инженер отдела систем РЗА, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (fedotov\_da@ekra.ru).

**БЫЧКОВ АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, руководитель группы отдела систем РЗА, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (bav.xlab@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-8626>).

ДОНИ НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, директор по науке, заведующий отделом систем РЗА, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (doni\_na@ekra.ru).

ДМИТРИЕВ ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – руководитель группы отдела систем РЗА, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (dmitriev\_ov@ekra.ru).

Dmitriy A. FEDOTOV, Anatoly V. BYCHKOV,  
Nikolay A. DONI, Oleg V. DMITRIEV

### ENSURING THE ACCURACY OF THE SYNCHROPHASOR MEASUREMENT IN THE P CLASS PHASOR MEASUREMENT UNIT

**Key words:** phasor measurement unit, synchrophasor measurement, digital signal processing, Fourier filter, orthogonal components.

*In distributed relay protection and automation systems of power systems, the widespread use of P class phasor measurement unit is assumed. The accuracy of phasor measurements is affected by frequency variation of power system signals, the presence of multiple harmonics and the features of the electromechanical transient process. The necessary accuracy of phasor measurement in these conditions is provided by appropriate digital processing of electrical quantities. In this paper, theoretical and practical issues of digital signal processing based on the classical Fourier filter in a P class phasor measurement unit are considered.*

**The purpose of the work** is to obtain an algorithm for processing the input signal in a P class phasor measurement unit based on the classical Fourier filter that provides the necessary measurement accuracy.

**Materials and methods.** When performing the work, the authors were guided by the regulatory documents. The methods of simulation modeling and mathematical simulation were used.

**Results of the work.** The main result of the study is an algorithm for processing the input signal for a P class phasor measurement unit based on the classical Fourier filter, which ensures the correct measurement of the synchrophasor in static and dynamic conditions. The obtained algorithm for processing the input signal based on the classical Fourier filter can be used to create a P class phasor measurement unit.

The algorithm obtained for processing the input signal in a P-class phasor measurement unit can also be applied to create M class unit by increasing the filtering properties.

**Conclusions.** The algorithm for measurement phasor values based on the classical Fourier filter is presented. The operation of the method has been tested in static and dynamic conditions using simulation modeling and mathematical simulation, and the compliance of the method with the accuracy of measurement requirements of the phasor measurement unit of the P class was shown. The proposed algorithm can also be applied to M class phasor measurement unit by increasing the filtering properties.

#### References

1. Antonov V.I. *Adaptivnyi strukturnyi analiz elektricheskikh signalov: teoriya i ee prilozheniya v intellektual'noi elektroenergetike* [Adaptive structural analysis of electric signals: the theory and its applications in intellectual power engineering]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2018, 334 p.
2. Klimov A.A., Nemkovich A.S., Ermolaev G.S. *Algoritm sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii dlya ustroystv klassa P c ispol'zovaniem interpolirovannogo diskretnogo preobrazovaniya Fur'e (DPF)* [Synchronized vector measurement algorithm for P class devices using interpolated discrete Fourier transform (DFT)]. *Releishchik*, 2019, no. 1(33), pp. 30–31.
3. Klimova T.G., Revyakin V.A. *Vozmozhnosti primeneniya ustroystv sinkhronizirovannykh vektornykh izmeritelei v raspredelitel'nykh setyakh* [Possibilities of application of phasor measurement units in electrical distribution networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2020, no. 6(63), pp. 110–115.
4. Klimova T.G., Revyakin V.A. *Povyshenie tochnosti i bystrodeistviya algoritmov pri tsifrovoi obrabotke signalov v zadachakh releinoi zashchity i avtomatiki* [Improving the accuracy and performance of algorithms for digital signal processing in relay protection and automation tasks]. *Releinyaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2023, no. 2(51), pp. 20–27.

5. Kolosok I.N., Korkina E.S., Tikhonov A.V. *Ispol'zovanie sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii pri modelirovaniі ustroystv FACTS v zadache otsenivaniya sostoyaniya EES* [The use of synchronized vector measurements in the modeling of FACTS devices in the task of estimating the state of the electric power system]. In: Voropai N.I., ed. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki: v 2-kh kn. (Tashkent, 23–27 sentyabrya 2019 g.)* [Methodological issues of reliability research of large energy systems: in 2 books, Tashkent, September 23–27, 2019]. Tashkent, 2019, pp. 228–237.

6. Lebedev A.A., Klimova T.G., Dubinin D.M. *Identifikatsiya avariynykh situatsii v elektroenergeticheskoi sisteme po dannym USVI* [Identification of emergency situations in the electric power system according to data from PMU]. *Releishchik*, 2019, no. 1(33), pp. 10–16.

7. Mokeev A.V. *Sintez BIKh fil'trov na osnove spektral'nykh predstavlenii v koordinatakh kompleksnoi chastoty* [Synthesis of IIR filters on the base of spectral expansion in coordinates of complex frequency]. *Tezisy dokladov 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye DSPA-2009»* [Proc. of the 11<sup>th</sup> Int. Sci. and Tech. Conf. «Digital signal processing and its applications DSPA-2009»]. Moscow, RNTORES Publ., 2009, pp. 169–172.

8. Mokeev A.V., Piskunov S.A. *Povysheniye effektivnosti distantsionnoi zashchity linii na osnove SVI v usloviyakh perekhodnykh protsessov i pri uchete vliyaniya dugi* [Improving the efficiency of remote line protection based on PMU in conditions of transients and taking into account the influence of the electric arc]. In: Stennikov V.A., ed. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki: materialy 94-go zasedaniya Mezhdunar. nauch. seminar, Alushta, 19–23 sentyabrya 2022 g.* [Methodological issues of reliability research of large energy systems: Materials of the 94<sup>th</sup> meeting of the International Scientific Seminar, Alushta, September 19–23, 2022]. Irkutsk, 2022, pp. 485–494.

9. Antonov V.I., Naumov V.A., Ivanov N.G. et al. *Obshchie nachala teorii fil'trov ortogonal'nykh sostavlyayushchikh* [Basic principles of orthogonal components filters theory]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2016, no. 1(22), pp. 17–26.

10. Antonov V.I., Naumov V.A., Martynov M.V. et al. *Osnovy releinoi zashchity i avtomatiki intellektual'noi elektricheskoi seti* [Fundamentals of relay protection and automation of an intelligent electrical network]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Pnul., 2023, 324 p.

11. Piskunov S.A., Mokeev A.V. *Primeneniye sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii dlya sovershenstvovaniya distantsionnogo printsipa raboty ustroystv releinoi zashchity* [The use of synchronized vector measurements to improve the remote principle of operation of relay protection devices]. In: *Sovremennyye tendentsii razvitiya tsifrovyykh sistem releinoi zashchity i avtomatiki: materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh spetsialistov foruma «RELAVEKSPO-2023», Cheboksary, 18–21 aprelya 2023 g.* [Modern trends in the development of digital relay protection and automation systems: Proc. of the Sci. and Tech. Conf. of young specialists of the forum «RELAVEXPO-2023», Cheboksary, April 18–21, 2023]. Cheboksary, 2023, pp. 87–90.

---

**DMITRIY A. FEDOTOV** – Post-Graduate Student, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University; Engineer, Ekra Ltd, Russia, Cheboksary (fedotov\_da@ekra.ru).

**ANATOLY V. BYCHKOV** – Candidate of Technical Sciences, Team Leader, Ekra Ltd, Russia, Cheboksary (bav.xlab@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-8626>).

**NIKOLAY A. DONI** – Candidate of Technical Sciences, Scientific Director, Department Head, Ekra Ltd, Russia, Cheboksary (doni\_na@ekra.ru).

**OLEG V. DMITRIEV** – Team Leader, Ekra Ltd, Russia, Cheboksary (dmitriev\_ov@ekra.ru).

---

**Формат цитирования:** Федотов Д.А., Бычков А.В., Дони Н.А., Дмитриев О.В. Обеспечение точности измерения синхровектора в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса // Вестник Чувашского университета. – 2024. – № 2. – С. 160–170. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-160-170.