

УДК 621.316.925

EDN NNIKQD

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ
ЧАСТОТОНЕЗАВИСИМЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ОРГАНОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
С ОДНОЙ ПОДВОДИМОЙ ВЕЛИЧИНОЙ**

С.В. Иванов

ORCID: 0000-0002-7461-0141 e-mail: serj3a@mail.ru

ООО «Релематика»

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
Чебоксары, Россия

Современные нормативные документы предъявляют требования к релейной защите по обеспечению корректной работы в широком диапазоне частот 40-80 Гц. В статье рассматривается методическая погрешность, возникающая при оценке действующего значения электротехнического сигнала неизвестной частоты. Анализируются различные способы определения действующего значения сигнала. С целью минимизации методической погрешности предлагается использовать многоканальный фильтр ортогональных составляющих.

Ключевые слова: многоканальный фильтр, фильтр действующего значения, фильтр ортогональных составляющих, частотонезависимые измерительные органы.

Для цитирования: Иванов С.В. Практические вопросы реализации частотонезависимых измерительных органов релейной защиты с одной подводимой величиной // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 68-76. EDN NNIKQD

**PRACTICAL ISSUES OF IMPLEMENTATION
OF FREQUENCY INDEPENDENT MEASURING
ELEMENTS FOR RELAY PROTECTION
WITH ONE SUPPLIED QUANTITY**

S.V. Ivanov

ORCID: 0000-0002-7461-0141 e-mail: serj3a@mail.ru

LLC «Relematika»

Chuvash State University n.a. I.N. Ulyanov
Cheboksary, Russia

Abstract. Modern standards impose requirements for relay protection to ensure correct operation in a wide frequency range of 40-80 Hz. The article discusses the methodological error that arises when estimating the effective value of an electrical signal of unknown frequency. Various methods for determining the effective value of a signal are considered. It is proposed to use a multi-channel filter of orthogonal components in order to minimize the methodological error.

Keywords: multichannel filter, valid value filter, orthogonal components filter, frequency independent measuring element.

For citation: S.V. Ivanov, "Practical issues of implementation of frequency independent measuring elements for relay protection with one supplied quantity", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 68-76, 2025. EDN NNIKQD

I. Введение

Большинство измерительных органов (ИО) релейной защиты (РЗ) используют в своей работе одну подводимую величину и реагируют на действующее значение некоего электротехнического сигнала. Это максимальные и минимальные ИО, использующие в своей работе, компоненты основной гармоники электротехнического сигнала. Современные нормативные документы предъявляют к РЗ требования корректной работы в широком диапазоне частот $f = 40 - 80$ Гц [1]. Ранее были разработаны специализированные методы выделения спектральных компонент, основанные на преобразовании Прони [2, 3]. В то же время данный подход требует отдельной реализации и больших вычислительных затрат. Также открыты остаются вопросы его работ в условиях нелинейных процессов – бросок тока намагничивания, насыщение трансформаторов тока.

II. Синтез фильтров ортогональных составляющих

В РЗ наиболее часто рассматривается сигнал, включающий в себя периодическую $i_{\text{пер}}(k)$ и апериодическую $i_{\text{ап}}(k)$ составляющие, которые наиболее ярко выражены при коротких замыканиях (КЗ):

$$i(k) = i_{\text{пер}}(k) + i_{\text{ап}}(k) = I_1 \sin(\omega h k + \varphi_1) + I_e e^{-\alpha h k}, \quad |I_e| \leq I_{\text{мл}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота сигнала, φ_1 – начальная фаза, h – период дискретизации, α – параметр затухания апериодической составляющей.

Чаще других для оценки составляющей гармонической составляющей $\hat{I}_1$ используется фильтр ортогональных составляющих (ФОС), основанный на дискретном преобразовании Фурье. Его структурная схема (рис. 1) включает в себя умножитель, опорный сигнал $\underline{f}_1(k)$, определяемый номинальной частотой сети $\omega_0 = 2\pi f_0$ ($f_0 = 50$ Гц), и заграждающий фильтр (ЗФ), реализующий операцию усреднения [2].

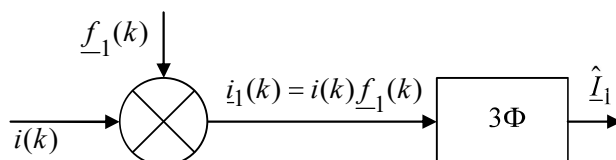


Рис. 1. Одноканальный фильтр ортогональных составляющих

Fig. 1. Single-channel orthogonal component filter

То же самое, но с математической точки зрения:

$$\hat{I}_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) e^{j\omega_0 v h k}, \quad (2)$$

где N – количество отсчетов на окне наблюдения.

Вследствие требований о быстродействии РЗ, ФОС ограничен в объеме наблюдаемой информации. Окно наблюдения фильтров, применяемых в задачах РЗ, как правило, не превышает один или два периода промышленной частоты (однопериодный или двухпериодный фильтры).

Необходимо обратить внимание, что (2) есть следствие применения метода наименьших квадратов [4] к аппроксимации исходного сигнала в предположении его следующей модели:

$$i_k = I_0 + \sum_{v=1}^{N/2} I_v \sin(v\omega_0 h k + \varphi_v), \quad (3)$$

где I_0 – постоянная составляющая, I_v – гармоническая составляющая частоты $v\omega_0$, v – номер гармонической составляющей.

В нормальном режиме частота энергосистемы близка к номинальной ($\omega \approx \omega_0$) и результат работы ФОС близок к фактическому значению $I_1 \approx \text{mod}(\hat{I}_1)$. Но при аномальных режимах, когда частота электротехнического сигнала отлична от номинальной ($\omega \neq \omega_0$), ФОС обладает методической погрешностью. Корректность оценки $\hat{I}_1$ удобно рассмотреть в базисе интервальной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) (рис. 2), которая показывает возможный диапазон изменения выходного сигнала ФОС по отношению к фактическому значению $A(f) = [\hat{I}_{1,\min}(f, t); \hat{I}_{1,\max}(f, t)] / I_1$ в зависимости от частоты анализируемого сигнала. Изменение во времени сигнала на выходе ФОС обусловлено тем, что в общем случае $f / f_0 \notin \mathbb{Q}$. Рис. 2 показывает, что ФОС с постоянной частотой опорного сигнала $\underline{f}_1(k)$

не позволяет обеспечить требования нормативной документации о погрешностях: $\pm 2,5\%$ при номинальной частоте, $\pm 5\%$ при изменении частоты от 45 до 55 Гц [5], $\pm 10\%$ – в диапазоне частот 40-80 Гц [1].

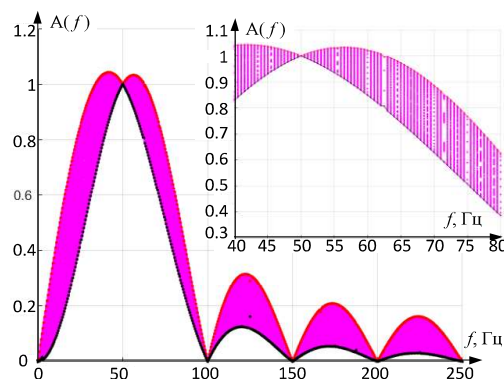


Рис. 2. Интервальная АЧХ однопериодного ФОС

Fig. 2. Interval frequency response of a single-period orthogonal component filter

Известно, что частота электротехнического сигнала определяется частотой работы энергосистемы, которая в свою очередь на практике может быть оценена с использованием каналов напряжения. Таким образом возможно привести в соответствие частоту опорного сигнала $\underline{f}_1(k)$ к частоте работы энергосистемы. Однако оценка частоты занимает несколько периодов исследуемого сигнала, что может привести к затягиванию в получении результатов и как следствие к снижению быстродействия РЗ, что на практике может быть недопустимо. Еще более значимым недостатком является то, что в простых устройствах РЗ появляется зависимость от каналов напряжения, что является крайне нежелательным. Можно рассматривать подход оценки частоты на основе анализа токового сигнала, но в этом случае начинают оказывать влияние нелинейные процессы в измерительных преобразователях (например, насыщение трансформатора тока), которые ставят дополнительную задачу выделения участков правильной трансформации даже для простых ИО, работающих с одной подводимой величиной.

Альтернативным решением может быть использование нелинейного фильтра, выделяющего действующее значение (*RMS*-фильтр) по известному алгоритму:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{k=0}^N i^2(k) / N}. \quad (4)$$

Его интервальная АЧХ показывает (рис. 3а), что в диапазоне частот 45-55 Гц погрешность измерения однопериодного *RMS* фильтра составляет $\pm 6\%$, а в диапазоне 40-80 Гц – $\pm 10\%$. Также у *RMS*-фильтра отсутствует методическая погрешность при номинальной частоте. Двухпериодный *RMS*-фильтр обеспечивает погрешность $\pm 5\%$ в во всем диапазоне частот 40-80 Гц (рис. 3 б).

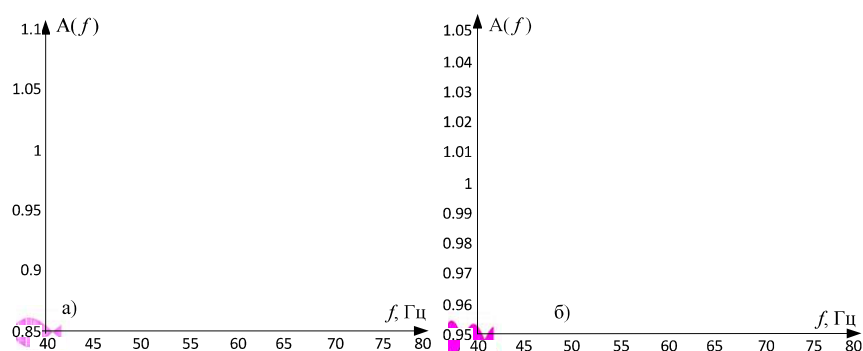


Рис. 3. Интервальная АЧХ *RMS*-фильтров в диапазоне частот [40...80] Гц:
а) однопериодный, б) двухпериодный

Fig. 3. Interval frequency response of *RMS* filters
in the frequency range [40...80] Hz:
a) single-period, b) two-period

В то же время интервальная АЧХ однопериодного *RMS*-фильтра показывает (рис. 4), существенное влияние (до $+40\%$) на результат измерения низкочастотных компонентов, которые на практике обусловлены апериодически затухающими переходными процессами. Также *RMS*-фильтр пропускает высокочастотные составляющие, которые генерируются нелинейной нагрузкой (тяговые подстанции железнодорожного транспорта, предприятия металлургии и т.д.). Высокочастотные составляющие также могут возникать в первый момент времени КЗ. По этой причине в РЗ используют фильтры, которые пропускают токи и напряжения с частотой, близкой к основной частоте, и подавляют низкочастотные и высокочастотные составляющие [6]. В свою очередь, *RMS*-фильтры используются для работы медленнодействующих ступеней защиты электрооборудования от перегрузки, поскольку высокочастотные составляющие также участвуют в его нагреве.

Можно рассмотреть иной подход оценки действующего значения [7], который состоит в использовании многоканального ФОС (МФОС). Он состоит из ряда элементарных фильтров (рис. 5), использующих преобразование Фурье (на рис. 5 $\underline{f}_1(k)$, $\underline{f}_2(k)$, $\underline{f}_n(k)$ – опорные сигналы произвольных

частот). Получив оценки ($\hat{\underline{I}}_1, \hat{\underline{I}}_2, \dots, \hat{\underline{I}}_n$) на выходе элементарных ФОС, необходимо выполнить их совместный анализ.

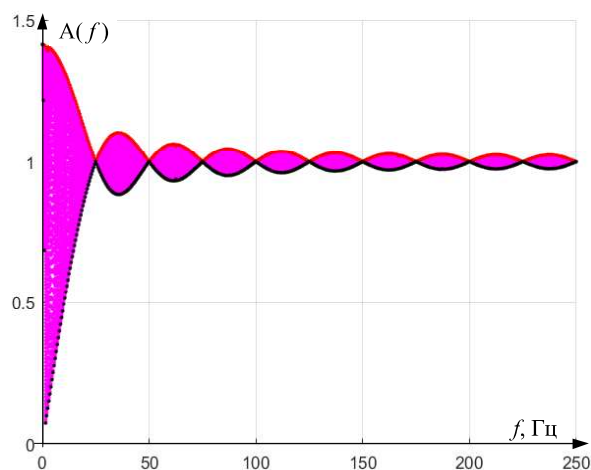


Рис. 4. Интервальная АЧХ однопериодного RMS-фильтра:
частоты $[0 \dots 250]$ Гц

Fig. 4. Interval frequency response of a single-period RMS filter:
frequencies $[0 \dots 250]$ Hz

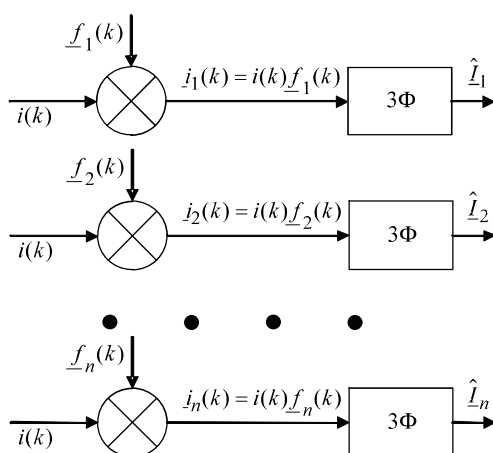
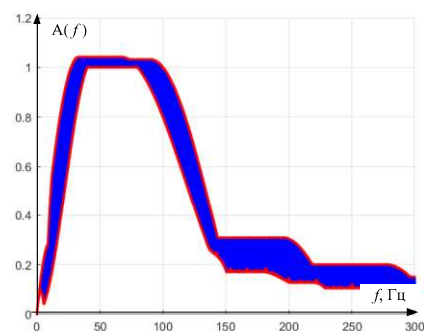


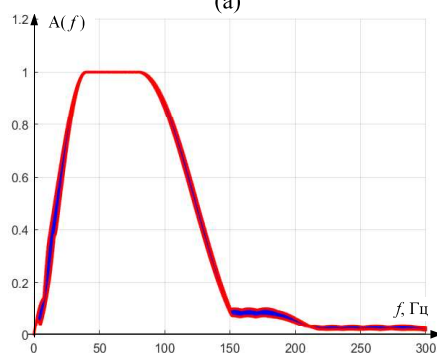
Рис. 5. Структура МФОС

Fig. 5. Structure of the multichannel orthogonal component filter

Очевидно, что для оценки уровня сигнала в диапазоне 40-80 Гц частоты опорных сигналов также должны находиться в этом диапазоне. Для микропроцессорных устройств РЗ (с постоянной частотой дискретизации f_s), частоты опорных сигналов удобно подбирать так, чтобы количество отсчетов на периоде наблюдения было целым ($N \in \mathbb{Z}$): $f_n = f_s / N$. Если рассматривать частоту дискретизации 2 кГц, то это частоты: $f_1 = 40$ Гц, $f_2 = 40,816$ Гц, $f_3 = 41,666$, ..., $f_n = 80$ Гц. В [8] предложен подход оценки действующего значения сигнала на основе метода максимального правдоподобия: $\hat{I} = \max_{\text{mod}} [\hat{I}_1, \hat{I}_2, \dots, \hat{I}_n]$. Интервальная АЧХ такого МФОС представлена на рис. 6 а.



(а)



(б)

Рис. 6. Интервальная АЧХ МФОС (а),
интервальная АЧХ МФОС с дополнительным усреднением (б)

Fig. 6. Interval frequency response of the multichannel orthogonal component filter (a), interval frequency response of the multichannel orthogonal component filter with additional averaging (b)

Во всем диапазоне частот МФОС, использующий метод максимального правдоподобия, обладает методической погрешностью, которая, хоть и не превышает 4 %, но не соответствует требованию по обеспечению погрешности $\pm 2,5$ % при частоте 50 Гц. Если изменить алгоритм работы ЗФ каждого канала, реализовав в нем усреднение на окне наблюдения 30 мс, то методическая погрешность определения действующего значения при соответствии частот энергосистемы и опорного сигнала отсутствует, а погрешность во всем диапазоне частот 40-80 Гц не превышает 0,1 %. Интервальная АЧХ такого фильтра приведена на рис. 6б.

III. Выводы

Введено понятие интервальной амплитудно-частотной характеристики, с помощью которой удобно оценивать методическую погрешность определения действующего значения сигнала в условиях вариации частоты полезного сигнала. Выполнено исследование методических погрешностей оценки действующего значения электротехнического сигнала, которые дают различные фильтры в базе интервальной амплитудно-частотной характеристики. Предложены способ определения действующего значения сигнала с использованием многоканального фильтра ортогонального составляющего, обеспечивающий точность оценки не более 0,1 % в диапазоне частот 40-80 Гц.

© Иванов С.В., 2025

Поступила в редакцию 19.08.2025

Принята к публикации 10.11.2025

Received 19.08.2025

Accepted 10.11.2025

Библиографический список

- [1] Типовые проектные решения при создании (модернизации) РЗА присоединений главных схем всех классов напряжения ГЭС. Типовые проектные решения ПАО «РусГидро». Раздел 1. Пояснительная записка. Часть 1. Технические требования к шкафам и микропроцессорным устройствам защиты и автоматики. 87-07-2015–РЗА.ТПР1.1, ПАО «РусГидро», 2024. – 60 с. [Электронный ресурс]. URL: storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/ (дата обращения 01.01.2025).
- [2] Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Фильтры информационных составляющих тока и напряжения электрической сети // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 1995. № 3. С. 174-189.
- [3] Марпл.-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: МИР, 1990. – 584 с.
- [4] Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. – 112 с.
- [5] СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Введ. 2017-02-28. ПАО «ФСК», 2017. – 179 с.
- [6] Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

- [7] Иванов С.В. Информационный анализ фильтров ортогональных составляющих для задач релейной защиты. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 5. С. 95-101.
- [8] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.

References

- [1] *Tipovye projektnye resheniya pri sozdanii (modernizacii) RZA prisoedinenij glavnyh skhem vseh klassov napryazheniya GES. Tipovye projektnye resheniya PAO "RusGidro". Razdel 1. Poyasnitel'naya zapiska. Chast' 1. Tekhnicheskie trebovaniya k shkafam i mikroprocessornym ustrojstvam zashchity i avtomatiki. 87-07-2015–RZA.TPR1.1* [Standard design solutions for the creation (modernization) of relay protection and automation systems for connections of the main circuits of hydro-electric power plants of all voltage classes. Standard design solutions of PJSC RusHydro. Section 1. Explanatory note. Part 1. Technical requirements for cabinets and microprocessor-based protection and automation devices. 87-07-2015–P3A.TPR1.1], PJSC RusHydro, 2024. [Online]. Available at: storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/ [Accessed: Jan. 1, 2025] (in Russian).
- [2] Y.Y. Liams and V.A. Ilyin, "Fil'try informacionnyh sostavlyayushchih toka i napryazheniya elektricheskoy seti [Filters of information components of current and voltage of an electric network]", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 3, pp. 174-189, 1995 (in Russian).
- [3] S.L. Marple, Jr., *Digital spectral analysis with applications*. Baltimore, Maryland: Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [4] R.W. Hamming, *Digital filters*. Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1977.
- [5] Technical requirements for microprocessor-based relay protection and automation devices, STO 56947007-29.120.70.241-2017, Feb. 2017.
- [6] N.V. Chernobrovov and V.A. Semenov, *Relejnaya zashchit energeticheskikh sistem [Relay protection of power systems]*. Moscow: Energoatomizdat, 1998 (in Russian).
- [7] S.V. Ivanov, "Information analysis of orthogonal components filter for relay protection tasks", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*, no. 5, pp. 95-101, 2017.
- [8] P.V. Ilyshin and A.L. Kylikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami energorajonov s raspredel'yonnoj generaciej [Control automation of normal and emergency mode of power systems with distributed generation]*. N. Novgorod: NIU RANHiGS [RANEPa], 2019 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий эксперт ООО «Релематика», г. Чебоксары, Российская Федерация.

Sergey V. I. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), lead Expert at the LLC «Relematika», Cheboksary, Russian Federation.