

УДК 621.316.925:681.3

В.Ф. Сивокобыленко (д-р техн. наук, проф.), С.В. Деркачев
Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск,
кафедра электрических станций, систем и электроснабжения
E-mail: svf1934@gmail.com; sergey_derkachev@mail.ru

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СИНУСОИД ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Предложен способ формирования алгоритмов цифровых измерительных органов тока (напряжения) для микропроцессорных устройств релейной защиты. Повышение быстродействия и качества фильтрации измерительных сигналов достигнуто за счет применения метода эквивалентных синусоид для получения ортогональных составляющих комплексов по дискретным мгновенным значениям аналогово-цифровых преобразователей. Амплитуду и начальную фазу эквивалентной синусоиды находят путем интегрального усреднения мгновенных значений на скользящем интервале наблюдения менее полупериода промышленной частоты. Приведены примеры, подтверждающие эффективность разработанного метода, позволяющего получить время срабатывания защиты не более 5 мс, тогда как при использовании известных методов с применением интеграла Фурье оно превышает 20 мс.

Ключевые слова: метод, ток, напряжение, измеритель, алгоритм, синусоида.

Общая постановка проблемы. В связи с развитием и совершенствованием вычислительной и микропроцессорной техники в электрических системах происходит сейчас замена устаревших электромеханических и аналоговых устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на современные микропроцессорные (МП). Последние позволяют улучшить функциональные характеристики устройств РЗА, повысить надежность и снизить эксплуатационные затраты на обслуживание [1-3]. Однако традиционные подходы к построению алгоритмов измерительных органов тока (напряжения), основанные на интервале наблюдения равном периоду промышленной частоты и на разложении входного сигнала с помощью интеграла Фурье [4,5], не позволяют обеспечить высокое быстродействие, хотя обеспечивают частотную фильтрацию и устранение аддитивных помех в виде стационарного белого шума. Алгоритмы измерительных органов, основанные на фиксации мгновенных значений сигнала в дискретные моменты времени и определении по одной или двум выборкам амплитуды и фазы предполагаемого синусоидального сигнала [6] имеют высокое быстродействие, но низкую помехоустойчивость. Таким образом, актуальным является разработка алгоритмов цифровых измерительных органов, которые бы имели время действия менее полупериода промышленной частоты и достаточно высокую помехоустойчивость. Такие алгоритмы требуются, например, для устройств быстродействующего АВР в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой [7-9] и др.

Постановка задач исследования. Целью работы является повышение быстродействия и помехоустойчивости цифровых измерительных органов тока (напряжения) микропроцессорных устройств релейной защиты путем применения интегрального усреднения дискретных мгновенных значений на заданном интервале наблюдения.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- усовершенствовать известный метод построения алгоритма цифровых измерительных органов на основе интеграла Фурье путем применения интервала наблюдения менее полупериода промышленной частоты;
- на основе метода эквивалентных синусоид [10] разработать способ получения по

мгновенным дискретным значениям токов (напряжений) ортогональных составляющих их комплексных величин;

– оценить эффективность разработанных методов.

Результаты разработки и исследований. В общем случае в электрических системах, как в стационарных, так и в переходных режимах, токи и напряжения отличаются от синусоидальных. Причиной этого являются нелинейности характеристик измерительных трансформаторов тока и напряжения, наличие помех, а также апериодических и свободных составляющих при коротких замыканиях и коммутациях в сети. Как уже упоминалось, получение ортогональных (синусно-косинусных) составляющих тока (напряжения) промышленной частоты с помощью интеграла Фурье увеличивает время действия защиты до 20 мс и более, так как интервал наблюдения должен быть не менее периода промышленной частоты.

Рассмотрим возможность сокращения интервала наблюдения. Положим, что ток (напряжение) изменяется по синусоиде с круговой частотой ω и начальной фазой ϕ . Тогда выражения для двух мгновенных значений токов для моментов времени t_1 и t_2 , разность между которыми равна шагу h , можем представить как:

$$i_1 = I_m \cos(\omega t_1 + \phi); \quad (1)$$

$$i_2 = I_m \cos(\omega t_1 + \phi + \omega h) = I_m [\cos(\omega t_1 + \phi) \cdot \cos(\omega h) - \sin(\omega t_1 + \phi) \cdot \sin(\omega h)]. \quad (2)$$

Из решения системы уравнений (1) и (2) найдем выражения для амплитуды тока I_m и начальной фазы ϕ :

$$I_m = \frac{1}{\sin(\omega h)} \cdot \sqrt{i_1^2 - 2i_1 i_2 \cos(\omega h) + i_2^2}; \quad (3)$$

$$\phi = \arctg \left[\frac{i_1 \cos(\omega t_2) - i_2 \cos(\omega t_1)}{i_1 \sin(\omega t_2) - i_2 \sin(\omega t_1)} \right]. \quad (4)$$

Для повышения помехоустойчивости амплитуду синусоиды и начальную фазу будем находить как усредненные по данным нескольких измерений. При этом их количество возьмем нечетным, а I_m и ϕ будем находить для центральных точек. Например, при шаге измерений h для пяти замеров $i(t_1), i(t_2), i(t_3), i(t_4), i(t_5)$ (см. рис. 1) среднее значение амплитуды I_m и начальной фазы ϕ для t_3 из (3) и (4) получим как:

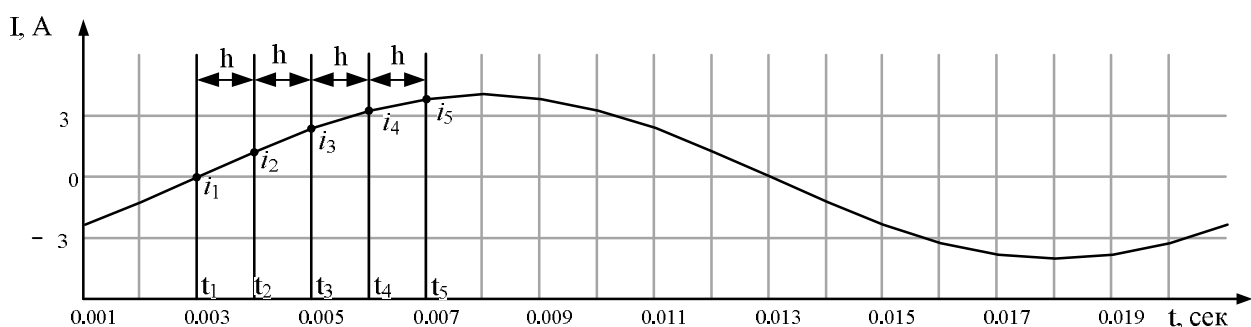


Рисунок 1 – Измерение мгновенных значений тока с шагом h

$$I_m = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{i(t_2)^2 - 2i(t_2)i(t_4)\cos(2h) + i(t_4)^2}}{\sin(2h)} + \frac{\sqrt{i(t_1)^2 - 2i(t_1)^2i(t_5)^2\cos(4h) + i(t_5)^2}}{\sin(4h)} \right]; \quad (5)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \left[\arctg \frac{i(t_4)\cos(\omega t_2) - i(t_2)\cos(\omega t_4)}{i(t_4)\sin(\omega t_2) - i(t_2)\sin(\omega t_4)} + \arctg \frac{i(t_5)\cos(\omega t_1) - i(t_1)\cos(\omega t_5)}{i(t_5)\sin(\omega t_1) - i(t_1)\sin(\omega t_5)} \right]. \quad (6)$$

Для примера на рис. 2 приведен исходный сигнал $i(t)$ (кривая 1), в котором кроме первой гармоники ($\omega = 314 \text{ с}^{-1}$), присутствуют также сигналы 11-й и 51-й гармоник.

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + 0,5) + 0,2 I_m \cos(11\omega t + 0,5) + 0,2 \cos(51\omega t + 0,2).$$

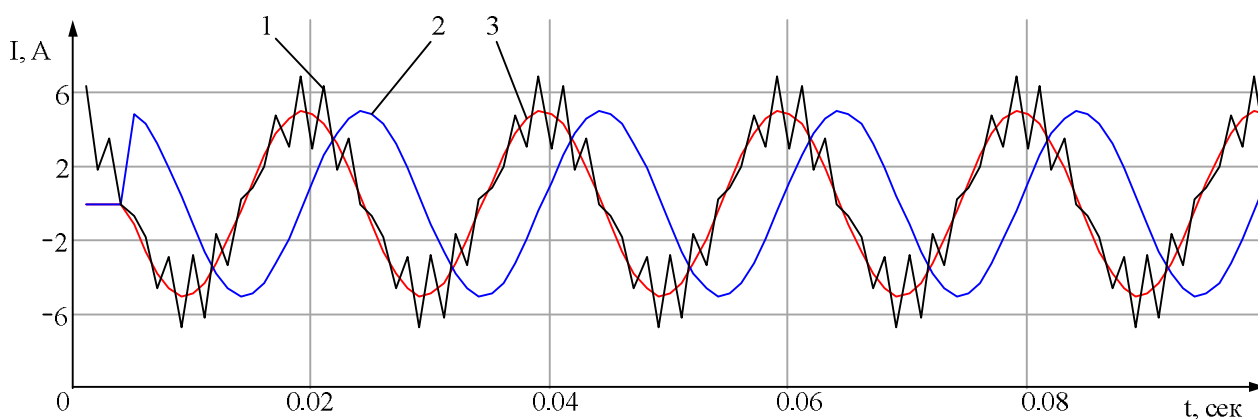


Рисунок 2 – Результат вычисления ортогональных составляющих с использованием двух интегральных выборок

Для скользящего интервала наблюдения размером 4 мс и шагом $h=1$ мс с помощью пяти выборок были определены по формулам (5) и (6) амплитуда I_m и фаза ϕ , а затем по (1,2) ортогональные составляющие эквивалентной синусоиды (кривые 2 и 3). Данный алгоритм наряду с высоким быстродействием обладает также хорошими фильтрующими свойствами благодаря тому, что усреднение выполняется относительно центральной точки интервала наблюдения.

Соотношения (1) – (6) используются также для формирования ортогональных составляющих комплексов напряжения. Совместное использование комплексов тока и напряжения позволяет реализовать алгоритмы определения направления мощности, сопротивления, а также симметричных составляющих электрических величин.

Рассмотрим еще один подход к формированию эквивалентных синусоид по мгновенным значениям сигналов и их производным. Если принять за основу приведенные ниже выражения для входного сигнала и его производной:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi); \quad (7)$$

$$i'(t) = -\omega I_m \sin(\omega t + \phi), \quad (8)$$

тогда амплитуду I_m , начальную фазу ϕ и комплекс тока можно найти как:

$$I_m = \sqrt{i^2(t) + \left(\frac{i'(t)}{\omega}\right)^2}; \quad (9)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{i'(t)}{\omega i(t)}\right) - \omega t; \quad (10)$$

$$\underline{i(t)} = |I_m| e^{j(\omega t + \phi)} = i(t) - j \frac{i'(t)}{\omega}. \quad (11)$$

В данном случае требуется численное определение производной (8) по мгновенным значениям измеряемых сигналов. Так как операция дифференцирования отличается меньшей точностью, чем интегрирования, мы поступим следующим образом. Сначала найдем усреднённое значение тока для середины интервала t_3 по пяти выборкам входного сигнала, что позволяет выполнить фильтрацию и снизить уровень влияния случайных помех.

$$i_{sred}(t_3) = \frac{1}{A_5} (i(t_1) + i(t_2) + i(t_3) + i(t_4) + i(t_5)). \quad (12)$$

В (12) из-за того, что функция синуса является нелинейной, а выборки ($n = 5$) производятся через одинаковый интервал времени h , коэффициент усреднения A_5 рассчитаем как отношение суммы всех токов n выборок к току центральной выборки:

$$A_n = \frac{\sum_{r=0}^{n-1} \cos(\omega \cdot (t_1 + h \cdot r) + \phi)}{\cos\left(\omega \cdot \left(t_1 + h \cdot \frac{n-1}{2}\right) + \phi\right)}. \quad (13)$$

При $n=5$ и $h=1$ мс из (13) получим $A_5=4,878$. Выражение (13) для $n=5$ после упрощения принимает вид:

$$A_5 = 1 + 2 \cdot (\cos(\omega \cdot h) + \cos(2\omega \cdot h)). \quad (14)$$

Теперь по полученным усредненным значениям мгновенных значений для интервала наблюдения найдем обладающие повышенной точностью центральные производные как

$$i'(t_3) = \frac{1}{12h} [i_{sred}(t_1) - 8 \cdot i_{sred}(t_2) + 8 \cdot i_{sred}(t_4) - i_{sred}(t_5)] \quad (15)$$

Комплекс тока теперь получим как

$$\underline{i(t_3)} = |I_m| e^{j(\omega t_3 + \phi)} = i_{sred}(t_3) + j i'(t_3). \quad (16)$$

На рис. 3 приведены результаты использования второго подхода, в котором для такого же, как на рис.1 исходного сигнала (кривая 1) по (12) вычислены усредненные i_{sred} мгновенные значения тока (кривая 3), а затем по (15) найдены производные (кривая 2).

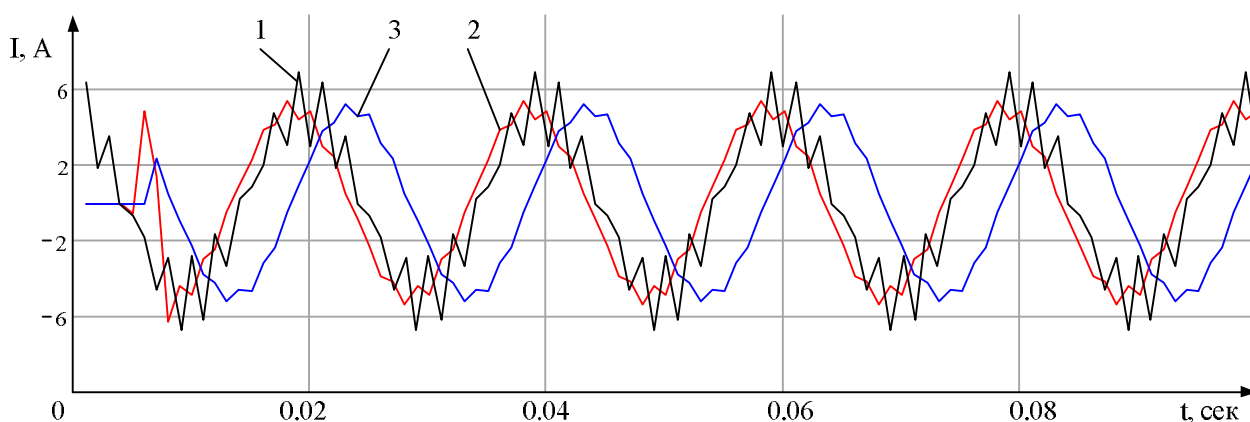


Рисунок 3 – Результаты расчета по алгоритму с производной входного сигнала

Сравнение двух разработанных алгоритмов показало, что первый более быстродействующий и его целесообразно применять при наличии в токах только нечетных гармонических составляющих. Второй алгоритм более эффективен при наличии также четных гармонических, а также апериодических составляющих.

Выводы.

1. Для цифровых ИО тока (напряжения) на основе метода эквивалентных синусоид предложен способ определения ортогональных составляющих их комплексов по дискретным значениям аналого-цифровых преобразователей.

2. Применение интегрального усреднения мгновенных значений на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты позволяет сократить время срабатывания до 5 мс вместо 20 мс, что имеет место в известных алгоритмах по методу интеграла Фурье.

3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований подтверждена эффективность разработанных методов.

Список использованной литературы

1. Гуревич В. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы / В. Гуревич. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.
2. Ванин В.К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат. 1991. – 336 с.
3. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
4. Лямец Ю.Я. Цифровая обработка сигналов для цепей релейной защиты / Ю.Я. Лямец // Применение микропроцессоров и микроЭВМ в электротехнике. – ЧГУ. Чебоксары, 1988 – С.11-34.
5. Ильин В.А. Характеристики алгоритма Фурье / В.А. Ильин, Ю.Я. Лямец // Применение микропроцессоров и микроЭВМ в электротехнике. – ЧГУ. Чебоксары, 1988 – С.28-34.
6. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

7. Киреева Э. Современные устройства быстродействующего АВР / Э. Киреева, В. Пупин, Д. Гумиров // Главный энергетик. – 2005. – № 11. – С. 23 – 25.
8. Никулов И. Комплекс БАВР Быстродействие повышает надёжность электроснабжения / И. Никулов, В. Жуков, В. Пупин // Новости электротехники. – 2012. – №4. – С. 2 – 4.
9. SUE3000 High Speed Transfer Device: Product Description [Электронный ресурс] / ABB Power and productivity for a better world, 2010. – 24 с. – Режим доступа: <http://www.abb.ua>.
10. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники 4-е издание. Том 2. Переходные процессы в электрических цепях. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. / К.С. Демирчян, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб: Питер, 2004. – 377с.

References

1. Gurevich, V. (2011), *Mikroprocessornye rele zashhity. Ustrojstvo, problemy, perspektiv* [Digital relay of protection. Device, problems and prospects], Infra-Inzheneriya, Moscow, Russia.
2. Vanin. V.K. and Pavlov G.M. (1991), *Relejnaja zashhita na jelementah vychislitel'noj tehniki* [Relay protection on the elements of computer technology.], 2nd ed., Energoatomizdat, S. Petersburg, Russia.
3. Fedoseev, A.M. (1984), *Releynaya zaschita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electric power systems.], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
4. Lyamcev, Y.Y. (1988), "Digital signal processing circuit for relay protection", *Primenenie mikroprocessorov i mikroJeVM v jelektrotehnike*, pp.11-24.
5. Iliin, V.A. and Lyamcev Y.Y. (1988), "Characteristics of Fourier algorithm", *Primenenie mikroprocessorov i mikroJeVM v jelektrotehnike*, pp.28-34.
6. Shneerson, E.M (2007), *Tsifrovaya releynaya zaschita* [Digital relay protection], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
7. Kireeva, E. Pupin V. and Gumirov D. (2005), "Modern devices of fast-acting ATS", *Glavhiy energetik*, vol. 11, pp. 23 – 25.
8. Nikulov, I., Gukov V. and Pupin V. (2012), "Fast-acting ATS: rapidity is increasing reliability of power supply", *Novosti elektrotechiki*, vol. 4, pp. 2 – 4.
9. SUE3000 High Speed Transfer Device: Product Description available at: <http://www.abb.ua/> (accessed March 30, 2015).
10. Demirchanb K.S. Korovkin N.V. and Chechurin V.L. (2004) *Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki Tom 2. Perehodnyie protsessyi v elektricheskikh tsepyah. Teoriya nelineynyih elektricheskikh i magnitnyih tsepey* [Theory of Electrical Engineering Volume 2. Transient. The theory of non-linear electric and magnetic circuits], Piter, S. Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию:
03.04.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. А.А. Зори

В.Ф. Сивокобиленко, С.В. Деркачов.

ДВНЗ «Донецкий национальный технический университет»

Метод еквівалентних синусоїд для цифрових вимірювальних органів релейного захисту. Запропоновано спосіб формування алгоритмів цифрових вимірювальних органів струму (напруги) для мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Підвищення швидкодії і якості фільтрації вимірювальних сигналів досягнуто за рахунок застосування методу еквівалентних синусоїд та отримання ортогональних складових їх комплексів за дискретними миттєвими значеннями аналогово-цифрових перетворювачів. Амплітуду і початкову фазу еквівалентної синусоїди знаходять шляхом інтегрального усереднення миттєвих значень на ковзному інтервалі спостереження меншого півперіоду промислової частоти. Наведено приклади, що підтверджують ефективність розробленого методу, що дозволяє отримати час

спрацьовування захисту не більше 5 мс, тоді як при використанні відомих методів із застосуванням інтеграла Фур'є перевищує 20 мс.

Ключові слова: метод, струм, напруга, вимірювач, алгоритм, синусоїда.

V. F. Syvokobylenko, S.V. Derkach.

Donetsk National Technical University

Equivalent sinusoids method for digital measuring devices of relay protection. *We proposed a method for forming algorithms of digital measuring current (voltage) for microprocessor relay protection. Increasing of rapidity and quality of filtering measuring signals are achieved by applying the method of equivalent sinusoids and receiving orthogonal components of their complex on the discrete instantaneous values of analog-to-digital converter. The amplitude and the initial phase of the equivalent sinusoidal are found by integral averaging of instantaneous values on the sliding interval less than half period of industrial frequency. The number of samples in the sliding interval with step h is accepted as odd and integral values are found for the middle of the interval. We considered two algorithms of definition of orthogonal components of complex equivalent sinusoids. In the first method the amplitude and initial phase are found by the method based on two samples of current (voltage) instantaneous values and in the second one – by one sample and by its numerically calculated first derivative. For increasing the accuracy the derivative is found as central taking into account all the samples in sliding interval and the filtering of interference is done with the help of definition of current instantaneous values on each step in the sliding interval. To clarify average values we received an analytical expression for correction coefficient, which depends on the samples quantity, step and network frequency. Comparison of two methods showed that first method is more fast and appropriate to use only in the presence of odd harmonic components in the current. The second algorithm is more effective in the presence of odd harmonic components and aperiodic components. The results confirmed the effectiveness of the developed method, which allows obtaining the reaction time of protection no more than 5 ms, whereas when using known methods with applying Fourier-Euler integral this time is more than 20 ms.*

Keywords: method, current, voltage measurer, algorithm, sinusoid.



Сивокобыленко Віталій Фёдорович, Україна, окончил Харьковский политехнический институт, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций, систем и электроснабжения. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – математическое моделирование переходных процессов и повышение надежности работы систем электроснабжения собственных нужд электростанций и промышленных предприятий.



Деркачів Сергій Володимирович, Україна, окончил Донецкий национальный технический университет, аспирант кафедры электрических станций, систем и электроснабжения. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – релейная защита и автоматика, повышение надёжности работы систем электроснабжения собственных нужд электростанций и промышленных предприятий, математическое моделирование в энергетике.