

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПО ПЕРЕХОДАМ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ НУЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ РЕАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

К.А. Иваненко, А.Н. Серов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва

В современных задачах электроэнергетики при измерении частоты сигнала самым распространенным является метод, который основан на определении переходов данного сигнала через нуль. Достоинством метода является простота анализа и реализации алгоритмов измерения, что позволяет предъявлять более низкие требования к элементной базе, используемой при реализации. Недостатком данного метода является значительное влияние гармоник и шумов на погрешность измерения частоты. В настоящей статье предложен новый вариант модификации данного метода измерения частоты сигнала. Проведенный в статье анализ показывает, что предлагаемая модификация позволяет снизить зависимость метрологических характеристик метода от неосновных спектральных составляющих измеряемого сигнала и шумов. Суть модификации состоит в использовании вместо нулевого уровня иного значения («оптимального уровня»), для которого применения метода по переходам сигнала через нуль будет более эффективно. Определение «оптимального уровня» сигнала происходит путем вычисления момента, который будет соответствовать максимальной производной измеряемого сигнала, т.е. его максимальному углу наклона. Определение значения производной сигнала происходит с помощью цифрового дифференциатора первого порядка. В работе рассмотрены варианты построения цифровых дифференциаторов и их влияние на погрешность измерения частоты. Уточнение моментов перехода сигнала через «оптимальный уровень», происходит с помощью кусочно-линейной аппроксимации сигнала в окрестностях перехода. В ходе работы было произведено имитационное компьютерное моделирование метода по переходам через нуль и его модификации с помощью программного пакета Simulink, а также получены аналитические выражения, характеризующие погрешность измерения частоты. В результате проведенного моделирования было произведено сравнение метрологических характеристик «классического» метода по переходам через нуль и предлагаемой модификации.

Ключевые слова: частота сигнала, интерполяция, дифференцирование, погрешность, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электроэнергетике частота является одним из наиболее важных параметров электрических сигналов. Согласно действующим нормативным документам [1], частота сигнала относится к основным параметрам показателей качества электроэнергии. Измерение основной частоты находит применение в задачах адаптивной фильтрации. Также измерение частоты применяется непосредственно в генераторах сигналов для улучшения их характеристик. Значение частоты сигнала косвенно влияет на погрешность измерения таких параметров как СКЗ, активная, реактивная и полная мощности. По этой причине измерение частоты применяется и для повышения точности измерения указанных параметров [1-4].

В настоящее время известно большое число цифровых методов измерения частоты. Данные методы можно условно разделить на три категории: основанные на обработке сигнала во временной области, в частотной области и частотно-временной области. Из публикаций [5]-[6] известно, что измерение частоты может быть выполнено путем применения спектрального анализа. При этом значение частоты соответствует положению в частотной области наибольшей по амплитуде

гармонике амплитудного спектра. Такой принцип измерения частоты лежит в основе большинства методов обработки сигнала в частотной области. Основным недостатком указанной группы – сложность практической реализации спектрального анализа и, как следствие, методов измерения частоты.

В основе методов измерения в частотно-временной области лежит комбинированный подход, который содержит в себе методы измерения в частотной области (спектральный анализ) и временной области (например, метод, основанный на определении переходов сигнала через нуль).

Группа методов, основанных на обработке сигнала во временной области наиболее многочисленная. Известно [9-10], что частота сигнала может быть получена на основе информации о скорости его изменения во времени. Так же измерить частоту можно путем применения адаптивного фильтра, используя значения его коэффициентов в установленном режиме [11]. Все указанные методы обладают существенным недостатком, так как позволяют точно измерить частоту только для случая синусоидального сигнала.

Результаты работ [2, 4-6, 12-15] показывают, что для области электроэнергетики наиболее перспективным методом и с точки зрения точности, и с точки зрения сложности реализации является метод,

основанный на определении переходов сигнала через нуль. В публикациях [2, 4-6, 12-15] изложены основные принципы измерения частоты при применении данного метода. В работе [5-6] для снижения погрешности измерения предлагается выполнение аппроксимации сигнала полиномом первого порядка, а в работе [2] – полиномом более высокого порядка. Одним из недостатком данного метода является существенное снижение точности в случае присутствия гармоник и шумов.

Тема данной статьи посвящена рассмотрению метода измерения частоты по переходу сигнала через нуль, а также его модификации, позволяющей повысить точность измерения частоты данным методом без увеличения времени измерения. Дополнительной задачей является оценка метрологических характеристик предлагаемой модификации и построение модели имитационного моделирования (которая в частности позволяет оценить сложности практической реализации рассматриваемой методики).

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Помимо электроэнергетики, метод по переходам входного сигнала через нуль нашел широкое применение в других областях [14-15]. Это обусловлено его высокими метрологическими характеристиками и относительной простотой реализации. В электроэнергетике данный метод является промышленным стандартом для определения частоты на интервале измерения 10 сек средств измерения показателей качества электроэнергии (СИ ПКЭ) [16-18].

Требования к точности измерения частоты зависят от решаемой задачи. Так для СИ ПКЭ максимальная погрешность измерения частоты не должна превышать 0,01 Гц [16-18]. Однако точность измерения частоты косвенно влияет на погрешность измерения других параметров (спектра, среднего квадратического значения, параметров электрической мощности и энергии). Известно [19], что погрешность измерения спектра и СКЗ для малых отклонений частоты от номинального значения линейно зависит от отклонения частоты. Повышение точности измерения частоты приводит к снижению требований к алгоритму определения измеряемого параметра и погрешностям, связанным с неидеальностью применяемой элементной базы. По этой причине задача повышения точности измерения частоты является актуальной.

Для случая измерения коэффициентов гармоник СИ ПКЭ [16-18] абсолютная погрешность измерения коэффициентов гармоник не должна превышать 0,05 % для коэффициентов гармоник более 1 %. Погрешность измерения спектра, связанная с алгоритмом измерения (алгоритм быстрого

преобразования Фурье с применением цифрового интерполятора Лагранжа 3-го порядка) может достигать 0,02 % [19-20] без учета инструментальных составляющих погрешности. Таким образом, предельная погрешность измерения частоты ограничена значением 0,01 %, а снижение реальной погрешности позволяет упростить требования к применяемой элементной базе.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Помимо метода по переходам сигнала через нуль, для измерения частоты полигармонического сигнала могут применяться метод по анализу приращения фазы сигнала (метод «фазор») [2, 5-6, 13], метод определения положения максимума спектра по аналитическим зависимостям [5-6, 7, 13], метод скользящего ДПФ [5-6] и метод, основанный на применении вейвлет-анализа [21-22]. Все рассмотренные методы позволяют измерять частоту электрических сигналов в условиях присутствия гармоник, шумов, интергармоник, супрагармоник и фликера различных форм.

Среди рассмотренных методов, метод по переходам сигнала через нуль обладает наименьшей сложностью реализации. Относительная простота анализа погрешности позволяет оптимально (без существенного завышения оценки погрешности) выбрать параметры (прежде всего, частоту дискретизации и нелинейность АЦП) системы. В отличие от остальных методов, погрешность измерения частоты методом по переходам сигнала через нуль не зависит от аддитивной и мультипликативной инструментальных составляющих погрешности измерительного канала.

Метод «фазор», метод скользящего ДПФ и метод, основанный на нахождении максимума спектра для реализации требуют дискретное преобразование Фурье. Для случая первых двух методов эта проблема может быть решена путем использования преобразователя Герцеля. В случае метода, основанного на определении максимума амплитудного спектра, более рациональным решением представляется применение быстрого преобразования Фурье. В любом случае реализация ДПФ представляет ряд технических трудностей и оправдана только в случае, если данное преобразование уже используется одним из алгоритмов измерения для других параметров сигнала.

Методы, основанные на вейвлет-анализе обладают высокой точностью, но сложны в практической реализации даже по сравнению с методами спектрального анализа, основанными на применении ДПФ. Их использование оправдано только в случае применения вейвлет-анализа для измерения других параметров (например, амплитудного и фазового

спектра, параметров активной реактивной и полной мощности, глубины провала, несимметрии).

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО ПЕРЕХОДАМ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ НУЛЬ

Наиболее распространенным способом измерения частоты является метод, который основан на определении переходов электрического сигнала через нуль. По определению, периодом является время, за которое происходит одно полное колебание сигнала. Следовательно, период может быть определен как время между переходами сигнала через заданный уровень. В качестве уровня выбирается нуль, поскольку в таком случае для синусоидального сигнала происходит наибольшая скорость изменения синусоидального сигнала, что уменьшает влияние шумов.

В общем случае, общий интервал измерения частоты включает в себя m периодов сигнала. Начало и конец интервала измерения определяется по переходам (одной выбранной полярности) сигнала через нуль. Наличие перехода определяются по изменению знака отсчетов с отрицательного на положительный (для положительного перехода). Для определения частоты запишем уравнение:

$$t_{cz,m} - t_{cz,1} = mT_1 = i_m T_S - i_1 T_S + \varepsilon_1 + \varepsilon_m, \quad (1)$$

где $t_{cz,1}$, $t_{cz,m}$ – моменты времени, соответствующие первому и m -му переходам сигнала через нуль; m – число полных периодов сигнала, которые укладываются за общее время измерения; $T_1 = 1 / f_1$ – период основной спектральной компоненты входного сигнала; i_1 , i_m – номер отсчета, ближайшего к первому и m -му переходам (выбранной полярности) сигнала через нуль за рассматриваемое время измерения; ε_1 , ε_m – положения моментов перехода через нуль в окрестностях шага дискретизации отсчетов i_1 , i_m .

Тогда частота основной гармоники напряжения может быть вычислена по формуле (где значения моментов перехода сигнала через нулевой уровень определяются согласно полученному выше соотношению (1)):

$$f_1 = \frac{m}{t_{cz,m} - t_{cz,1}}. \quad (2)$$

В самом простом случае значениями ε_1 , ε_m можно пренебречь и выражение (1) записать как:

$$t_{cz,m} - t_{cz,1} \cong T_S (i_m - i_1) = NT_S, \quad (3)$$

где $N = (i_m - i_1)$ – число дискретных отсчетов, соответствующее времени между первым и последним переходом сигнала через нуль за время измерения.

Очевидно, что погрешность измерения данного метода определяется допущением (3), а именно, значениями ε_1 , ε_m значения которых не учитываются в данном подходе. Если отсчеты i_1 , i_m определяются как ближайшие к моментам перехода через нуль, то

значение ε_1 , ε_m не превышает половины шага дискретизации. Тогда значение относительной погрешности измерения частоты может быть записан как (применен закон накопления частных погрешностей):

$$\delta f_1 = \frac{\Delta t_{cz,m} - \Delta t_{cz,1}}{t_{cz,m} - t_{cz,1}} \leq \frac{T_S}{mT_1}. \quad (4)$$

Из полученного выражения видно, что погрешность измерения частоты снижается с увеличением частоты дискретизации $f_S = 1 / T_S$ и общего времени измерения (которое определяет число периодов входного сигнала – параметр m).

Для повышения точности измерения на практике используются методы, позволяющие получить оценку значений ε_1 , ε_m . Наиболее популярный подход состоит в линеаризации сигнала вблизи его перехода через нуль. На Рис. 2 показаны основные принципы данного подхода. Согласно данному подходу, значения ε_1 , ε_m (обобщенное обозначение ε_x) могут быть оценены с помощью следующих выражений:

$$\varepsilon_x = -\frac{x_1}{x_2 - x_1} T_S; \quad (5)$$

$$\varepsilon_x = \frac{x_2}{x_2 - x_1} T_S, \quad (6)$$

где x_1 , x_2 – левый (соответствующий меньшему значению времени) и правый отсчеты сигнала на интервале дискретизации, для которого зафиксирован переход через нуль, то есть $(x_1 \cdot x_2) < 0$.

Выражение (5) соответствует случаю, когда отсчет i_x , ближайший к переходу сигнала через нуль, определен по левой границе шага дискретизации. Выражение (6) соответствует случаю, когда отсчет i_x определен по правой границе перехода.

Рассматриваемый подход существенно снижает погрешность измерения частоты, оценку данной погрешности для случая синусоидального входного сигнала можно найти в [12]:

$$\delta_f = \frac{0.06 \omega_{max}^3}{\pi n f_S^3}, \quad (7)$$

где ω_{max} – максимальное значение угловой частоты входного сигнала.

Помимо погрешности, связанной с округлением до целого числа отсчетов (см. выражение (4)) и линеаризацией сигнала вблизи перехода через нуль (см. выражение (7)) существует составляющая погрешности, вызванная влиянием гармоник сигнала и шумов.

Известно, что наличие во входном сигнале шумов может приводить к изменению моментов переходов через нуль. Данное смещение является случайной величиной так как определяется воздействием случайного сигнала – шума. Тогда в общем случае для первого и последнего (m -го) переходов через нуль за рассматриваемое время измерения смещение

принимает различные значения. Это приводит к возникновению погрешности измерения частоты, что видно из (4).

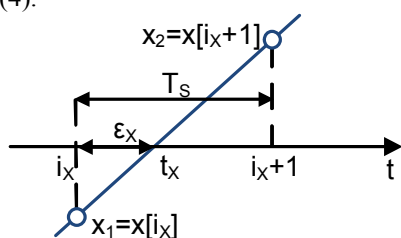


Рис. 1 Основные принципы измерения частоты методом, основанным на определении переходов сигнала через нуль. Доопределение моментов перехода выполняется путем применения кусочно-линейной аппроксимации.

При этом вероятность возникновения смещения перехода через нуль тем выше, чем меньше скорость изменения сигнала вблизи его перехода через нуль. Для случая синусоидального сигнала уровень нуля соответствует максимальной скорости изменения входного сигнала. Наличие гармоник во входном само по себе не приводит к увеличению погрешности измерения. Однако может снизить скорость изменения сигнала в окрестностях нуля, что приводит к увеличению погрешности, вызванной воздействием шума. Для снижения влияния шума известно применение входных полосовых или низкочастотных фильтров, а также усреднение результатов измерения частоты. Данные подходы приводят к существенному увеличению времени измерения, что ограничивает их применение.

На практике, во избежание возникновения ложных переходов, при достижении очередного перехода через нуль рекомендуется вводить временную задержку на поиск последующего перехода [5-6].

МОДИФИКАЦИЯ ПО ПЕРЕХОДУ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ УРОВЕНЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Как говорилось ранее, уровень нуля для определения моментов пересечения сигнала был выбран из соображений максимальной скорости изменения синусоидального сигнала. Увеличение скорости изменения сигнала (наклон) в моменте пересечения заданного уровня, приводит к снижению погрешности в условиях входного шума. Для случая полигармонического сигнала (наличие в спектре гармоник), максимальная скорость изменения сигнала может соответствовать произвольному уровню входного сигнала. Идея предлагаемой модификации состоит в определении переходов через уровень, который соответствует максимальной скорости измерения входного полигармонического сигнала в рассматриваемый момент времени.

С учетом предлагаемой модификации, метод по переходам сигнала через нуль может быть представлен следующим алгоритмом:

- определение уровня D_{max} , соответствующего максимальной скорости изменения входного сигнала;
- получение отсчетов сигнала i_1, i_m , соответствующих первому и последнему (m -му) переходам (одной полярности) сигнала через полученный в предыдущем пункте уровень D_{max} ;
- определение числа переходов (одной полярности) m за общее время измерения;
- доопределение моментов ϵ_1, ϵ_m перехода через уровень D_{max} с помощью (5) или (6);
- определение времени между первым и последним m -м переходами – (1);
- вычисление значения частоты сигнала с помощью формулы (2).

Предлагаемый подход сохраняет все достоинства “классического” метода по переходам сигнала через нуль, но лишен недостатков, связанных с увеличением влияния шума в условиях наличия гармоник во входном сигнале.

Погрешность измерения в случае отсутствия доопределения моментов перехода сигнала заданного уровня определяется выражением (4). При применении доопределения моментов перехода путем использования кусочно-линейной аппроксимации значение погрешности может быть оценено с помощью зависимости (7). При этом форма измеряемого сигнала должна быть близкой к синусоидальной. Указанные выражения учитывают только погрешность, вызванную дискретностью отсчетов сигнала (выражение (4)) и погрешностью аппроксимации (выражение (7)). Погрешность, связанная влиянием шума данными соотношениями не учитывается.

Для снижения указанных погрешностей, уровень, по которому определяются моменты перехода сигнала (D_{max}) может быть выбран равным отсчету $x[i_1]$. Это позволяет исключить значение ϵ_1 из выражения (1). Соответственно, значение уровня $D_{max} = x[i_1]$. При этом удастся снизить погрешность измерения в два раза и в случае применения доопределения моментов перехода, и без применения доопределения.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО ДИФФЕРЕНЦИАТОРА

Предлагаемый подход диктует необходимость реализации цифрового дифференциатора (получения первой производной) для оценки значения производной сигнала. Наиболее распространенный тип цифрового дифференциатора использует только два отсчета входного сигнала, что определяет его достоинства (простоту реализации) и недостатки (низкую точность):

$$y[n] = \frac{x[n] - x[n-1]}{T_s} \quad (8)$$

Однако помехозащищенность такого дифференциатора низка. Поэтому для снижения

влияния шума требуется дополнительное применение цифрового фильтра. Данный фильтр должен подавлять входной шум и все гармоники входного сигнала для обеспечения высокой точности определения производной.

Другой подход предполагает применение дифференциатора более высокого порядка. Повышение порядка дифференциатора снижает влияние неосновных гармоник и шумов (то есть повышает его помехозащищенность). Для повышения помехозащищенности может быть применен дополнительный низкочастотный или полосовой фильтр. Данный фильтр должен быть настроен таким образом, чтобы подавлять неосновные гармоники и шумы и пропускать основную спектральную компоненту. В качестве цифрового фильтра может быть применен любой КИХ или БИХ фильтр.

Передаточное уравнение дифференциатора, использующего семь отсчетов сигнала имеет вид [9]:

$$y[n] = \frac{x[n+3] - x[n-3]}{60 \cdot T_s} + \frac{9(x[n+2] - x[n-2])}{6,67 \cdot T_s} + \frac{45(x[n+1] - x[n-1])}{60 \cdot T_s} \quad (9)$$

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С помощью программного пакета Simulink была построена модель имитационного моделирования измерительного преобразователя частоты, в основе функционирования которого лежит метод, основанный на определении моментов перехода сигналов через уровень, соответствующий максимальной производной входного сигнала. Схема показана на Рис. 2.

Общая схема обозначена на рисунке как «Основная схема». Метод измерения частоты на основе перехода сигнала через уровень, соответствующий максимальной производной входного сигнала обозначен как «Zero-crossing technique dir_mod». Блок «Signal-max derivative» предназначен для определения уровня, соответствующего максимальной производной входного сигнала. В основе построения данного блока лежит цифровой дифференциатор первого порядка по семи отсчетам входного сигнала – блок «7th point differentiator». Блок «Zero-crossing technique» предназначен для измерения частоты сигнала путем определения переходов сигнала через заданный уровень. Значение уровня поступает с выхода блока «Signal-max derivative». Вычисление относительной погрешности измерения выполняется с помощью блока «Relative error». Данный блок подходит для определения относительной погрешности измерения любой величины, в том числе, частоты.

Как видно из формулы (1) для определения частоты сигнала рассматриваемым методом требуются значения моментов времени первого и

последнего переходов сигнала через нуль. Для этих целей служат блоки «Determination of the first zero crossing sample number» и «Determination of the last zero crossing sample number». Расчет результата измерения частоты (формула (1)) выполняется с помощью блока «Calculation». Для определения числа переходов сигнала через нуль используется блок «Counter (zero-crossing number)».

В работах [2, 6] было выполнено имитационное моделирование «классического» метода по переходах сигнала через нуль. Результаты показывают, что достичь точности в 0,01 % для случая полигармонического входного сигнала искаженного белым шумом возможно только в случае применения входного фильтра. В работах был применен фильтр Баттерворта 3-го порядка и полосовой фильтр, основанный на применении ДПФ [21]. Применение дополнительного фильтра увеличивает время измерения на 0,03 сек (для фильтра Баттерворта) и 0,02 сек (номинальное значение периода сигнала – для применения ДПФ как фильтрации). Динамическая погрешность измерения частоты до завершения переходных процессов фильтра может достигать десятых долей процента.

Результаты имитационного моделирования представлены в Таблице 1. При выполнении имитационного моделирования были использованы следующие параметры: входной сигнал – полигармонический, содержит две гармоники; амплитудное значение второй спектральной компоненты – 10 % от основной спектральной компоненты. Начальная фаза сигнала – (соответственно основная и вторая гармоники); частота дискретизации – 10 кГц; общее время измерения – 2 сек. В последних строках таблицы 1 представлено соотношение погрешности для случая полигармонического сигнала искаженного шумом для рассмотренных методов измерения частоты («классический» и модифицированный методы по переходу сигнала через нуль).

Таблица 1. Сравнительный анализ погрешности методов измерения частоты (значения относительной погрешности указаны в процентах)

Метод измерения частоты	Отклонение частоты, δf , %		
	-5,0	0,0	+5,0 %
Синусоидальный сигнал, 1 В СКЗ			
Метод по переходам через нуль	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
По уровню макс. производной	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
Полигарм. сигнал (1ая и 5ая гармоники) + 0,1 % СКЗ белый шум			
Метод по переходам через нуль	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
По уровню макс. производной	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Полигарм. сигнал (1ая и 5ая гармоники) + 1 % СКЗ белый шум			
Метод по переходам через нуль	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
По уровню макс. производной	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Соотношение методов			
Случай 0,1 % СКЗ белый шум	2,4	4,1	2,7
Случай 1 % СКЗ белый шум	2,6	3,2	7,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

– метод, основанный на определении переходов сигнала через нуль позволяет выполнять измерение частоты как синусоидальных, так и полигармонических сигналов;

– основной источник погрешности связан с влиянием шума, которое усиливается при наличии в спектре сигнала гармоник;

– для снижения влияния шума предложен способ, основанный на определении максимальной производной входного сигнала;

– с помощью программного пакета Simulink построена модель имитационного моделирования измерительного преобразователя частоты, реализующая предлагаемый метод измерения;

– путем имитационного моделирования показано, что предлагаемая методика позволяет снизить погрешность измерения до 7 раз.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, balanced or unbalanced conditions, IEEE Std. 1459-2010.

2. M.M. Begovic; P.M. Djuric; S. Dunlap; A.G. Phadke. "Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, issue 2, 1993, pp. 480-486.

3. P. Petrovic; S. Marjanovic, M. Stevanovic. "Digital method for power frequency measurement using synchronous sampling," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 146, issue 4, 1999, pp. 383-390.

4. Р. Л. Стратонович. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. – М.: Сов. Радио, 1961. — 558 с.

5. A. Serov. "Frequency estimation methods for stationary signals," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1–6.

6. Andrey N. Serov; Alexander Novitskiy; Alexander A. Shatokhin; Steffen Schlegel; Ekaterina A. Dolgacheva; Dirk Westermann. "Comparative Analysis of Digital Frequency Measurement Methods for Power Networks," 2020 3rd International Colloquium on Intelligent Grid Metrology, 2020, pp. 1-8.

7. D. Agrez. "Fast measurement of power system frequency in the frequency domain," XVIII IMEKO world congress of Metrology for a Sustainable Development, 2006.

8. A.N. Serov, A.A. Shatokhin, N.A. Serov. "Features of Application of Frequency Measurement Technique Based on Spectral Analysis for Real Electrical Power Networks," Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019), 2019, pp. 1-6.

9. A.M. Zayezdny; Y. Adler; I. Druckmann. "Short time measurement of frequency and amplitude in the presence of noise", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 41, issue 3, pp. 397–402, 1992.

10. Wu Jiekang "Wide range parameter measurement of sinusoidal signals", Journal of electrical engineering, vol. 57, issue 2, pp. 111–115, 2006.

11. D. Halb wachs, P. Wira, and J. Mercklé, "Adaline-based approaches for time-varying frequency estimation in power systems", 2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing (ICONS 2009), Istanbul, Turkey, September 21-23, 2009.

12. Andrey Serov, Alexander Shatokhin, Ivan Konchalovsky. "A research on the influence of non-ideal analog-to-digital converter on the measurement error of frequency," Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017, Kladovo, Serbia, pp.1-5.

13. B. Boashash. "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. II. Algorithms and applications," Proceedings of the IEEE, vol. 80, issue 4, 1992, pp. 540-568.

14. Ф. Коти, Ч. Ерейдес. Ультразвуковой метод измерения скорости горения: ошибки, шумы и чувствительность // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т.36. – № 1. – С. 59-67.

15. Герасимов С. И., Захряпин Е. С., Ким С. В., Серов А. Н. Исследование метода измерения частоты по переходам сигнала через нуль // Сборник докладов XXVI международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». – Алушта, 2017. – С. 116 – 117.

16. ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств – М.: Стандартинформ. – 2008. – 34с.

17. ГОСТ Р 51317.4.30 – 2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электроэнергии – М.: Стандартинформ. – 2008. – 54с.

18. ГОСТ Р 8.656 – 2009. Средства измерений показателей качества электроэнергии. Методика поверки – М.: Стандартинформ. – 2010. – 20с.

19. A.N. Serov, A.A. Shatokhin, G.V. Antipov, "Sample rate converter as a means of reducing measurement error of the voltage spectrum by application of FFT," 2019 29th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2019 - Microwave and Radio Electronics Week, MAREW 2019.

20. Andrey N. Serov; Alexander Novitskiy; Alexander A. Shatokhin; Steffen Schlegel; Ekaterina A. Dolgacheva; Dirk Westermann. "The Influence of Power Frequency Deviation on the Active and Reactive Power Measurement Error with the Application of DFT," 2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), pp. 1-6.

21. E.Y. Hamid; Zen-Ichiro Kawasaki, R. Mardiana. "Wavelet packet transform for RMS and power measurements," Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 1243–1245, 2001.

22. M.J. Devaney; Weon-Ki Yoon. "Reactive power measurement using the wavelet transform," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 49, issue 2, pp. 246–252, 2000.

Иваненко Кирилл Андреевич – инженер кафедры Диагностических информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», тел. (495)3627214, e-mail: IvanenkoKA@mpei.ru

Серов Андрей Николаевич – к.т.н., доцент кафедры Диагностических информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», тел. (495)3627214, e-mail: SerovAN@mpei.ru

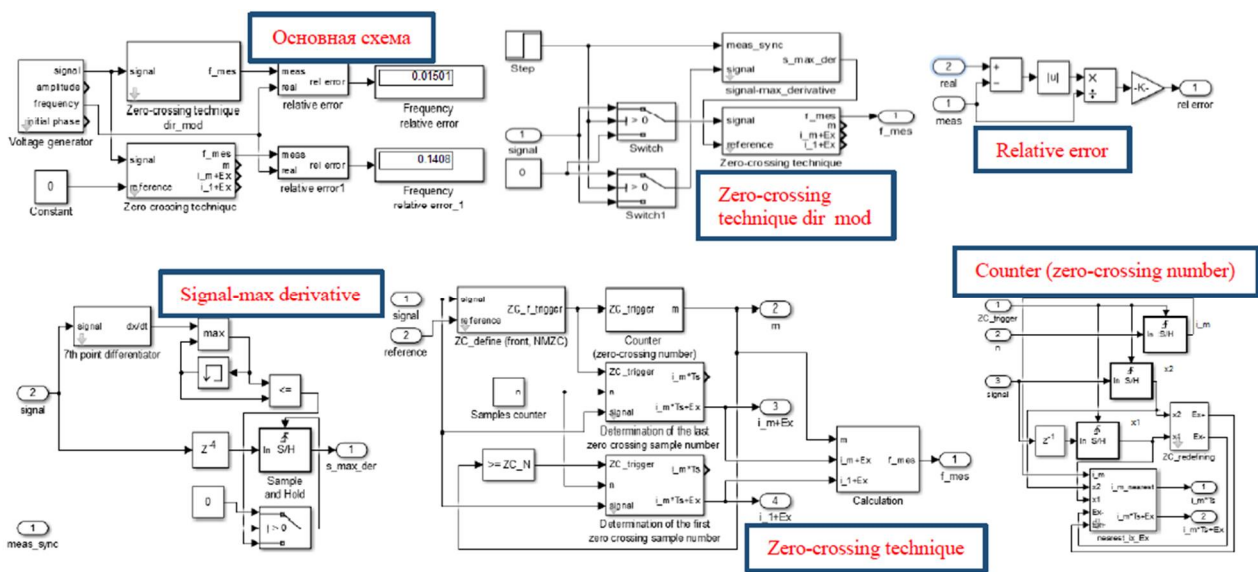


Рис. 2. Модель измерительного преобразователя частоты, выполненная на базе пакета имитационного моделирования Simulink.

APPLICATION OF THE ZERO CROSSING TECHNIQUE FOR THE FREQUENCY MEASUREMENT OF THE REAL POWER NETWORK SIGNALS

K.A. Ivanenko, A.N. Serov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Abstract – In solving modern problems of the electric power industry, when measuring the signal frequency, the most common method is based on determining the zero crossings of a given signal. The advantage of the method is the simplicity of the analysis and implementation of measurement algorithms, which makes it possible to impose lower requirements on the element base used in the implementation. The disadvantage of this method is the significant influence of harmonics and noise on the frequency measurement error. In this article, a new version of the modification of this method for measuring the signal frequency is proposed. The analysis carried out in the article shows that the proposed modification to reduce the dependence of the metrological characteristics of the method on the minor spectral components of the measured signal and noise. The essence of the modification consists in the additional use of another value instead of the zero level, for which the application of the method for signal zero crossings will be more effective. The signal level is determined by calculating the torque that will correspond to the maximum derivative of the measured signal, i.e. its maximum tilt angle. The derivative value of the signal is determined using a first-order digital differentiator. The paper considers options for constructing digital differentiators and their influence on the frequency measurement error. The moments of signal transition through the level corresponding to the maximum derivative are refined using piecewise linear approximation of the signal in the vicinity of the transition. In the course of the work, a computer simulation of the zero-crossing method and its modifications was carried out using the Simulink software package, and analytical expressions were obtained that characterize the frequency measurement error. As a result of the simulation, a comparison was made between the metro-logical characteristics of the "classical" zero-crossing method and the proposed modification.

Index terms: signal frequency, interpolation, differentiation, measurement error, simulation modeling.

REFERENCES

1. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, balanced or unbalanced conditions, IEEE Std. 1459-2010.
2. M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke. "Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, issue 2, 1993, pp. 480-486.
3. P. Petrovic, S. Marjanovic, M. Stevanovic. "Digital method for power frequency measurement using synchronous sampling," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 146, issue 4, 1999, pp. 383-390.
4. R. L. Stratonovich. "Selected questions of the theory of fluctuations in radio engineering," Moscow, Sov. Radio, 1961.— 558 p.
5. A. Serov. "Frequency estimation methods for stationary signals," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1-6.
6. Andrey N. Serov; Alexander Novitskiy; Alexander A. Shatokhin; Steffen Schlegel; Ekaterina A. Dolgacheva; Dirk Westermann. "Comparative Analysis of Digital Frequency Measurement Methods for Power Networks," 2020 3rd International Colloquium on Intelligent Grid Metrology, 2020, (in press).
7. D. Agrez. "Fast measurement of power system frequency in the frequency domain," XVIII IMEKO world congress of Metrology for a Sustainable Development, 2006.
8. A.N. Serov, A.A. Shatokhin, N.A. Serov. "Features of Application of Frequency Measurement Technique Based on Spectral Analysis for Real Electrical Power Networks," Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2019), 2019, pp. 1-6.
9. A.M. Zayezdny; Y. Adler; I. Druckmann. "Short time measurement of frequency and amplitude in the presence of noise", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 41, issue 3, pp. 397-402, 1992.
10. Wu Jiekang "Wide range parameter measurement of sinusoidal signals", Journal of electrical engineering, vol. 57, issue 2, pp. 111-115, 2006.
11. D. Halbwachs, P. Wira, and J. Mercklé, "Adaline-based approaches for time-varying frequency estimation in power systems", 2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing (ICONS 2009), Istanbul, Turkey, September 21-23, 2009.
12. Andrey Serov, Alexander Shatokhin, Ivan Konchalovsky. "A research on the influence of non-ideal analog-to-digital converter on the measurement error of frequency," Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017, Kladovo, Serbia, pp.1-5.
13. B. Boashash. "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. II. Algorithms and applications," Proceedings of the IEEE, vol. 80, issue 4, 1992, pp. 540-568.
14. F. Koty, C. Ereides. "Ultrasonic method for measuring the combustion rate: errors, noise and sensitivity," Physics of combustion and explosion, 2000, vol. 36, No. , pp. 59-67.
15. S.I. Gerasimov, E.S. Zakhryapin, S.V. Kim, A.N. Serov. "Investigation of a method for measuring frequency by signal zero crossings," Collection of reports of the XXVI international scientific and technical conference "Modern technologies in control problems, automation and information processing", Alushta, 2017, pp. 116-117.
16. GOST R 51317.4.7-2008. Electromagnetic compatibility of technical means. General guidance on measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and connected technical means, Moscow, Standartinform, 2008, 34p.
17. GOST R 51317.4.30-2008. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods for measuring power quality indicators, Moscow, Standartinform, 2008, 54p.
18. GOST R 8.656 - 2009. Means for measuring power quality indicators. Verification technique, Moscow, Standartinform, 2010, 20p.

19. A.N. Serov, A.A. Shatokhin, G.V. Antipov, "Sample rate converter as a means of reducing measurement error of the voltage spectrum by application of FFT," 2019 29th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2019 - Microwave and Radio Electronics Week, MAREW 2019, pp. 1-6.

20. Andrey N. Serov; Alexander Novitskiy; Alexander A. Shatokhin; Steffen Schlegel; Ekaterina A. Dolgacheva; Dirk Westermann. "The Influence of Power Frequency Deviation on the Active and Reactive Power Measurement Error with the Application of DFT," 2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), pp. 1-6.

21. E.Y. Hamid; Zen-Ichiro Kawasaki, R. Mardiana. "Wavelet packet transform for RMS and power measurements," Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 1243–1245, 2001.

22. M.J. Devaney; Weon-Ki Yoon. "Reactive power measurement using the wavelet transform," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 49, issue 2, pp. 246–252, 2000.

Ivanenko Kirill Andreevich – engineer at the department of Diagnostic Information Technologies, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", (495)3627214, e-mail: IvanenkoKA@mpei.ru

Serov Andrey Nikolaevich – PhD in technical sciences, associate professor at the department of Diagnostic Information Technologies, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", (495)3627214, e-mail: SerovAN@mpei.ru