

Д.А.ГАПОН, ст. преп., НТУ «ХПИ»

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПО МОМЕНТАМ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ФИКСИРОВАННЫХ УРОВНЕЙ

У роботі описано новий метод вимірювання частоти і швидкості її зміни по моментам перетину вхідного сигналу з набором фіксованих рівнів. Наведено основні співвідношення, а також наведені результати експериментальних досліджень розглянутого методу.

В работе описан новый метод измерения частоты и скорости ее изменения по моментам пересечения входного сигнала с набором фиксированных уровней. Приведены основные соотношения, а также приведены результаты экспериментальных исследований рассматриваемого метода.

This paper describes a new method for measuring the frequency and rate of change of the moments of intersection of the input signal with a set of fixed levels. The basic relationships and results of measurement error experimental studies are given.

Введение. Развитие современных средств противоаварийной автоматики, и, в частности, автоматической частотной разгрузки (АЧР) обусловлено применением все более совершенных аппаратных средств. Ключевым элементом современного устройства управления в подавляющем большинстве случаев является микропроцессор или микроконтроллер. Непрерывный рост производительности и объемов доступной памяти вычислительных устройств позволяет применять более сложный и эффективный математический аппарат для решения различных задач. В то же время актуальность проблемы совершенствования системы АЧР подтверждается значительным количеством публикаций выпускающихся как в Украине, так и за ее пределами. Одним из основных направлений разработки является повышение быстродействия и помехоустойчивости средств частотной разгрузки, что невозможно без разработки новых совершенных методов измерения частоты промышленной сети. В качестве основных требований к методу измерения промышленной частоты выступают [1,2]:

- высокое быстродействие (1...5 периодов основной гармоника),
- высокая точность (погрешность измерения в рабочем диапазоне не более 0.05 Гц),
- высокая устойчивость к помехам и искажениям исходного сигнала.

Постановка задачи. Для реализации большинства разработанных методов, способных удовлетворить вышперечисленные требования, необходимы значительные вычислительные мощности, что, в свою очередь, приводит к удорожанию и снижению надежности конечных устройств [3,4]. На практике же наиболее часто применяемым методом

определения частоты промышленной сети является метод определения периодов сигнала по моментам переходов сигнала через нулевой уровень, так как он наиболее прост в реализации. В то же время метод имеет ряд существенных недостатков, которые обусловлены тем, что используется только небольшая часть информации о характере входного сигнала, а те значения, которые не находятся вблизи нулевого уровня игнорируются. Таким образом, целесообразна разработка более совершенного метода, который способен использовать максимальное количество входных отсчетов с целью повышения точности измерения и помехоустойчивости.

Решение задачи. Более полно учесть характер входного сигнала можно, если рассматривать моменты переходов сразу через несколько фиксированных уровней. Пусть имеется некоторый уровень L значение которого меньше амплитудного значения входного сигнала. Тогда, любой периодический сигнал должен пересекать этот уровень число раз кратное двум за один свой период. Для синусоидального сигнала число пересечений любого уровня за один период равно двум. Причем интервал между произвольным i -м и $i+2$ -м пересечениями соответствует периоду. Однако, сигналы тока и напряжения подвержены ряду искажений, наиболее характерным из которых является наличие высших гармоник. В этом случае могут возникать дополнительные переходы через какой-либо уровень. Тогда, для определения моментов, отстоящих на один период можно учитывать то свойство периодических сигналов, что за два полных периода любой уровень будет пересечен число раз кратное четырем (рис. 1).

Исключением является случай, когда точка пересечения совпадает с локальным экстремумом. Тогда если сигнал пересекает некоторый уровень L_j число раз равное $4 \cdot k$ в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_{4k} , то интервал между моментами t_i и t_{i+2k} для $i \in [1, 2k - 1]$ будет равен периоду сигнала T_{ji} . Таким образом может быть получено множество значений периода T . В силу различных обстоятельств, таких как погрешность измерения сигнала и его нестационарность полученные значения периодов будут отличаться. Далее необходимо из имеющегося множества периодов получить значение частоты сети. При возникновении переходных процессов частота в системе меняется по закону близкому к линейному [1]. Тогда, если известно некоторое количество K значений периодов T_m , $m = 1..K$ и известны моменты времени, соответствующие их началам t_m , то по этим значениям можно найти уравнение, описывающее значение частоты с учетом возможного ее изменения во времени. Наиболее целесообразным представляется нахождение уравнение первого порядка вида $f(t) = xt + \phi_0$, где ϕ_0 - начальное значение периода, x - скорость изменения.

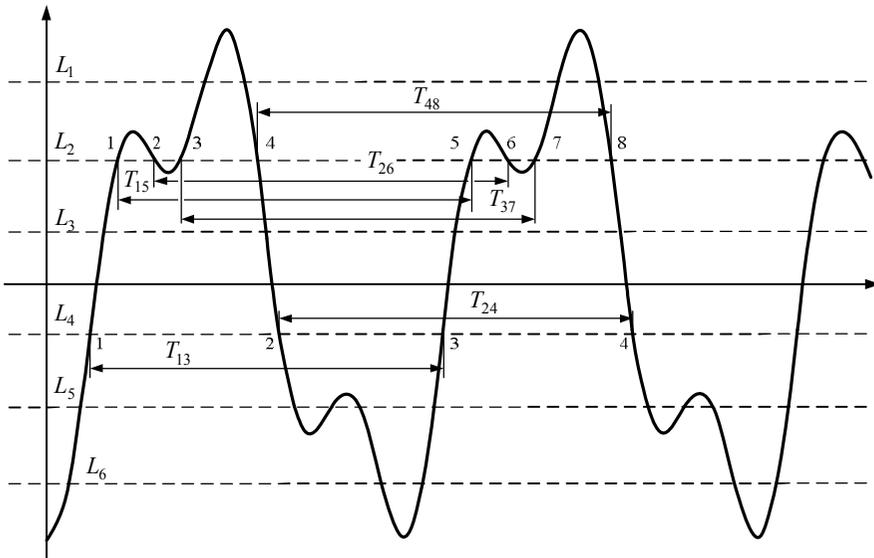


Рис. 1 - Определение величины периода сигнала по моментам пересечения нескольких уровней

Согласно методу наименьших квадратов коэффициенты уравнения могут быть найдены из соотношений:

$$\sum_{i=1}^K T_i t_i = x \sum_{i=1}^K t_i^2 + \phi_0 \sum_{i=1}^K t_i, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^K T_i = x \sum_{i=1}^K t_i + K \phi_0. \quad (2)$$

Откуда:

$$x = \frac{K \sum_{i=1}^K T_i t_i - \sum_{i=1}^K T_i \sum_{i=1}^K t_i}{\sum_{i=1}^K t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^K t_i \right)^2 / K}, \quad \phi_0 = \frac{\sum_{i=1}^K T_i \sum_{i=1}^K t_i - \sum_{i=1}^K T_i \sum_{i=1}^K t_i}{\sum_{i=1}^K t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^K t_i \right)^2 / K}. \quad (3)$$

Полученные уравнения позволяют не только определить значение периода, а, следовательно, и частоты сети в течение рассматриваемого интервала, но и оценить скорость ее изменения.

Кроме того, наличие множества исходных значений дает возможность выполнить оценку «качества» входного сигнала. Для этого необходимо вычислить отклонения значений периодов от полученного закона:

$$\partial_i = T_i - \phi_0 - x t_i. \quad (4)$$

После чего можно найти границы доверительного интервала отклонения значений периода:

$$T_c - \Delta < T_c < T_c + \Delta. \quad (5)$$

При $K \leq 30$ оценка выполняется по формуле:

$$\Delta = l_{\alpha, K} \frac{\sigma_T}{\sqrt{K}}, \quad (6)$$

где $l_{\alpha, K}$ - значение критерия (квантиля) распределения Стьюдента, при односторонней точности оценки параметра, выбираемое в зависимости от доверительной вероятности и числу степеней свободы, определяемое по таблицам распределения Стьюдента, а y_T - несмещенная выборочная дисперсия и может быть найдена из соотношения:

$$y_T^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K \partial_i^2. \quad (7)$$

Для объема выборки $K > 30$:

$$D = l_{\alpha, K} \frac{y_T}{\sqrt{K-1}}. \quad (8)$$

Результатом всех вычислений являются значения верхней границы текущего значения частоты, нижней границы, и скорости ее снижения.

Заключение. С целью определения свойств и качества работы рассмотренного метода было выполнено математическое моделирование. В табл. 1 приведены результаты расчета достижимой точности при применении аналого-цифрового преобразования (АЦП) с частотой дискретизации 2048 Гц и разрядностью 12 бит.

Таблица 1 - Зависимость величины ошибки от частоты

Частота, Гц	Минимум, Гц	Максимум, Гц	Среднеквадратическое отклонение
50	49.99877730	50.00141375	0.00048336
49,9	49.89837823	49.90170191	0.00045669
49,5	49.49901704	49.50165803	0.00044127
49	48.99869174	49.00138060	0.00046016
48	47.99972724	48.00029245	0.00042540
47	46.99892014	47.00120402	0.00049817

При этом входной сигнал представляет собой неискаженную синусоиду различной частоты. Можно сделать вывод о том, что точность измерения достаточно высока и практически не зависит от частоты входного сигнала.

В табл. 2 показана зависимость среднеквадратической ошибки от частоты дискретизации АЦП при неизменной разрядности 12 бит и частоте входного сигнала 49,5 Гц.

Таблица 2 - Зависимость ошибки от частоты дискретизации

Частота дискретизации, Гц	Среднеквадратическое отклонение
1600	0.00062444
3200	0.00045880
6400	0.00038637

В табл. 3 приведен характер зависимости среднеквадратической ошибки от числа разрядов АЦП при неизменной частоте дискретизации 3200 Гц и частоте входного сигнала 49,5Гц.

Таблица 3 - Зависимость ошибки от числа разрядов АЦП

Число разрядов	Среднеквадратическое отклонение
10	0.00185824
12	0.00045880
14	0.00012343
16	0.00004052

Таким образом, рассмотренный метод обладает высокой точностью при сохранении достаточного быстродействия, что позволяет реализовать наиболее современные и актуальные методы выполнения частотной разгрузки. Применение доверительного интервала позволяет исключить возможность ложных срабатываний при каких-либо переходных процессах в энергосистеме сопровождающихся значительными искажениями формы напряжения в узлах нагрузки.

Список литературы: 1. Данильчук В.Н. Современная аппаратура частотных автоматик разгрузки, ввода резервов ГЭС, защит и блокировок / В.Н. Данильчук, И.Ф. Нехай, Е.А. Коломиец, В.А. Перетяцько // Электрические сети и системы - 2008- №2. – С. 45-64. 2. Phadke A.G. Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions./ Phadke A.G., Kasztenny B.// IEEE Transactions on Power Delivery – 2009 - vol. 24 no.1 – P.89–95. 3. Zoran Salcic. An Improved Taylor Method for Frequency Measurement in Power Systems / Zoran Salcic, Sing Kiong Nguang // IEEE Transactions on instrumentation and measurement - 2009 - vol.58,no.9 – P.3288-3294 4. Hyeon-Jin Jeon . Iterative Frequency Estimation Based on MVDR Spectrum / Hyeon-Jin Jeon, Tae-Gyu Chang // IEEE Transactions on power delivery - 2010 - vol.25,no.2 - P.621-630.

Поступила в редколлегию 28.03.2012