

Панова Ксения Сергеевна

инженер по метрологии

ООО «Челэнергоприбор»

г. Челябинск, Челябинская область

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА

***Аннотация:** в данной статье описаны различные методы измерения фазового сдвига между двумя сигналами, приведены алгоритмы их работы. Автор высказывает предположение о возможности использования описанных методов путем алгоритмической обработки сигнала, без использования схемотехнических преобразований, а также возможности проведения факторного анализа с целью оценки влияния параметров сигналов на точность преобразования.*

***Ключевые слова:** измерение фазового сдвига, преобразования Гилберта, цифровые фазометры.*

Развитие приборостроительной промышленности в настоящее время, связанное с повышением возможностей микропроцессорной техники требует все более точных методов оценки физических величин без использования схемотехнических приемов. Данный факт подталкивает к оптимизации алгоритмов цифровой обработки измерений физических величин.

Одно из направлений, в котором возможны подобные исследования – цифровая фазометрия.

Измерение фазового сдвига необходимо во многих областях техники. Одним из направлений является измерение мощности [1].

На данный момент существует множество методов измерения фазового сдвига между двумя сигналами. Данные методы делятся по принципу своей работы на корреляционные, ортогональные, преобразователи фазовый сдвиг – напряжение – код, преобразователи фазовый сдвиг – временные интервалы – код и другие классические методы, к которым можно отнести, например метод трех вольтметров.

Основной обзор методов измерения фазы приведен в [2]. Среди описанных автором методов присутствуют и оптимальные (по максимуму правдоподобия) фазоизмерители, однако ряд из предложенных методов измерения фазы требуют точной оценки параметров сигнала. Рассмотрим некоторые методы измерения фазового сдвига.

Преобразователи фазовый сдвиг – временные интервалы – код

Фазометры этого типа преобразуют два входных сигнала во временные импульсы. Наиболее просто реализовать данный алгоритм при генерации импульсов при переходе через ноль. Таким образом, определения фазового сдвига сводится к формуле:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi f \cdot t_\varphi = 2\pi \cdot \frac{t_\varphi}{T}, \quad (1)$$

где $t_\varphi = t_{\varphi 1} - t_{\varphi 2}$ – временная задержка сигналов, f и T – частота и период сигналов соответственно.

Преобразователи фазовый сдвиг – напряжение – код

Преобразователи фазовый сдвиг – напряжение – код основаны на принципе преобразования фазового сдвига в уровень напряжения, который легко подвергается измерению.

Недостаток данного метода в нелинейной зависимости выходного постоянного напряжения от измеряемой разности фаз, а также само наличие зависимости между выходным напряжением и амплитудами входных напряжений.

Метод преобразования схож с предыдущим. Разность фаз двух синусоидальных напряжений u_1 и u_2 одинаковой частоты $\omega = 2\pi/T_0$ можно записать таким образом:

$$\varphi = 360^\circ \cdot \frac{T_1}{T_0}, \quad (2)$$

где T_0 – разность моментов времени, когда колебания имеют одинаковую фазу.

Корреляционные фазометры

Корреляционные фазометры представляют собой широкую группу приборов, основанную на принципе измерения значения взаимокорреляционной функ-

ции между сигналами в начале координат. Связь взаимокорреляционной функции двух гармонических сигналов с известными амплитудами A_1 и A_2 и их фазовый сдвиг:

$$K_{1,2} = \frac{A_1 \cdot A_2}{2} \cos(\varphi). \quad (3)$$

Таким образом, фазовый сдвиг будет:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{K_{1,2}}{A_1 \cdot A_2}\right). \quad (4)$$

Данные приборы имеют сильную зависимость от соотношения сигнал-шум и слабую чувствительность в начале и в конце диапазона измерения. Также существенным недостатком корреляционного фазометра является нелинейный характер шкалы, требуется выполнить вычисления тригонометрической функции. Линейную зависимость показаний от фазового сдвига обеспечивают корреляционные фазометры с перекрытием.

Корреляционные фазометры с перекрытием

Корреляционные фазометры с перекрытием используют схему на логических элементах для измерения фазового сдвига. Они не чувствительны к смещению сигнала относительно нулевого потенциала.

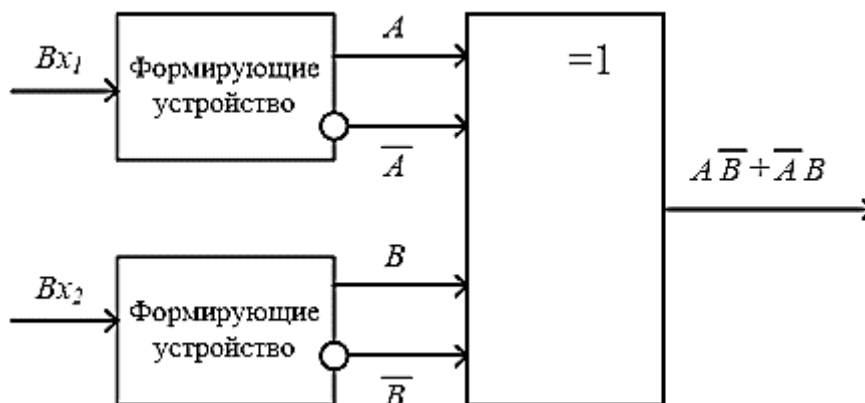


Рис.1. Схема фазометра с перекрытием

Принцип действия данного фазометра основан на преобразовании входных сигналов формирующими устройствами в прямоугольные импульсы и приведение импульсов к логическим уровням, которые подаются на Исключающее ИЛИ, на выходе формируются прямоугольные импульсы, длительность которых пропорциональна фазовому сдвигу.

Ортогональные фазометры

Алгоритм работы ортогональных фазометров заключается в том, что сигнал можно разложить по ортогональному базису. Исходя из такого разложения справедливо:

$$\int_0^{T_n} s(t) U_m \cos(\omega_0 t + \varphi) dt = U_m \cos \varphi \int_0^{T_n} s(t) \cos \omega_0 t dt - U_m \sin \varphi \int_0^{T_n} s(t) \sin \omega_0 t dt = 0. \quad (5)$$

Из этого следует, что фаза равна:

$$\varphi = \arctg \frac{a_c}{a_s}, \quad (6)$$

где:

$$a_c = U_m \cos \varphi \int_0^{T_n} s(t) \cos \omega_0 t dt; \quad a_s = U_m \sin \varphi \int_0^{T_n} s(t) \sin \omega_0 t dt. \quad (7)$$

Ортогональные измерители фазового сдвига требуют знания частоты сигнала, что приводит к ряду сложностей, однако данный метод можно реализовать по средству преобразования Гилберта [3]. Подобные фазометры получили широкое распространение в радиоизмерениях. При этом интерес представляет влияние на точность данного метода способ усреднения измеренных значений фазы.

Фазометр с использованием метода трех вольтметров [4]

Метод связан с расчетным воспроизведением значения фазового сдвига, чем исключается использование фазометра и заключающийся в раздельном измерении амплитуд двух синусоидальных сигналов U_1 , U_2 и амплитуды суммарного напряжения U_3 . При этом из соотношения:

$$U_3^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_{1-2}, \quad (7)$$

Из этой формулы можно получить выражение для расчета фазового сдвига φ_{2-1} между напряжениями U_2 и U_1 .

$$\varphi_{1-2} = \arccos \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_3^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}. \quad (8)$$

Таким образом, у описанных методов можно отметить следующие достоинства: данные методы не требуют большого количества известных данных.

Данные методы можно реализовать с помощью программной обработки дискретных данных полученных непосредственно с АЦП.

При использовании описанных методов упрощается анализ их погрешностей, например, методом Монте-Карло [5], ведь они имеют цифровую модель, которая содержит их основной принцип работы. Данный факт позволяет проводить численные эксперименты над ними и улучшения математической модели для специфичных шумов и сигналов. Также перспективным направлением является оценка влияния параметров сигналов на точность преобразования, для чего необходимо использовать факторный анализ.

Список литературы

1. Панова К.С. Предпосылки к разработке цифрового преобразователя мощности / К.С. Панова // Приоритетные направления развития науки и образования: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 29 янв. 2016 г.) / Редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС Интерактив плюс, 2016.

2. Чмых М.К. Цифровая фазометрия / М.К. Чмых. – М.: Радио и связь, 1993. – 184 с.

3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. пособие для вузов / И.С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

4. Асеев Б.П. Фазовые соотношения в радиотехнике / Б.П. Асеев. – М.: Связьиздат, 1959. – 306 с.

5. Мунтянов С.Н. Методы оценки погрешности измерительных преобразователей / С.Н. Мунтянов // Образование и наука в современных условиях: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 16 апр. 2015 г.) / Редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС Интерактив плюс, 2015.