

УДК 621.317.729.3

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗЫ АНТЕННОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

КОВАЛЕВИЧ Д. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Определены особенности использования измерителя фазы в антенном согласующем устройстве. Проведен анализ причин появления искажений в выходном сигнале измерителя фазы. Разработан алгоритм, позволяющий компенсировать эти отклонения.

Abstract. The peculiarities of using a phase meter in an antenna matching device are determined. The analysis of the output signal distortion causes of the phase meter is carried out. The compensation algorithm for these deviations has been developed.

Введение

Процесс согласования применительно к автоматическим согласующим устройствам (СУ) состоит из двух этапов: измерение параметров нагрузки и выработка управляющих сигналов для элементов согласующей цепи. Измеритель фазы является неотъемлемой частью СУ, независимо от типа измеряемых электрических величин и используемых алгоритмов работы.

СУ, использующие поисковые алгоритмы, не предъявляют высоких требований к точности измерителя фазы. Более того, в случае наличия аппаратных датчиков активного сопротивления и активной проводимости необходимо только определение ее знака. При проектировании СУ с малым временем настройки, использующие расчетные способы согласования, требуется достаточно высокая точность определения фазы.

Особенность используемого в СУ измерителя связана с динамическим диапазоном входных сигналов. Так как модуль сопротивления мобильных антенн может изменяться в пределах от десятков Ом до единиц кОм в рабочем диапазоне частот [1], то динамический диапазон сигналов датчиков тока и напряжения может превосходить 30 дБ. Для реализации такого измерителя подходит схема цифрового фазового детектора, изображенного на рис. 1. Он состоит из входных компараторов, логического элемента «исключающее ИЛИ», D-триггера и фильтров низких частот (ФНЧ).

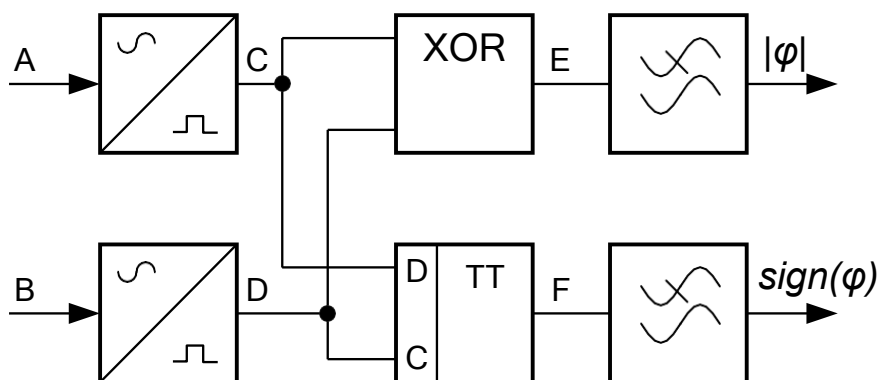


Рис. 1. Цифровой фазовый детектор

Однако такой реализации тоже свойственны погрешности измерения. Рассмотрим механизмы возникновения искажений и методы повышения точности измерителя.

Теория

Одной из причин появления погрешностей при измерении фазы является конечное ненулевое значение гистерезиса компараторов. Так как цифровой фазовый детектор определяет разность фаз между входными сигналами по их переходам через ноль, то любое искажение фазы при нахождении положения этой точки вызовет соответствующие изменения в выходном сигнале. Для расчета величины фазового набега, обусловленного гистерезисом, примем некоторые допущения:

- входные сигналы имеют синусоидальную форму;
- вносимый фазовый сдвиг имеет достаточно малое значение.

Выходной сигнал компаратора с гистерезисом изменит свой уровень с некоторым смещением по фазе относительно точки перехода через ноль (рис. 2.). Приведенное значение порогового уровня компаратора приравняем к значению входного сигнала, задержанного по фазе относительно точки перехода через ноль:

$$\sin(\Delta\varphi) = \frac{H/2}{A} = \frac{H}{2\sqrt{2}U_{RMS}} \approx \Delta\varphi, \quad (1)$$

где H – гистерезис компаратора;

A – амплитуда входного сигнала;

U_{RMS} – среднеквадратичное значение входного сигнала;

$\Delta\varphi$ – ошибка в определении точки перехода через ноль входного сигнала.

Точно можно определить фазовый набег по формуле:

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{H}{2\sqrt{2}U_{RMS}}\right). \quad (2)$$

В упрощенном с учетом принятых допущений виде:

$$\Delta\varphi = \frac{H}{2\sqrt{2}U_{RMS}}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (2), ошибка в определении положения точки перехода через ноль, обусловленная гистерезисом компаратора, зависит только от уровня входного сигнала, и не зависит от его частоты.

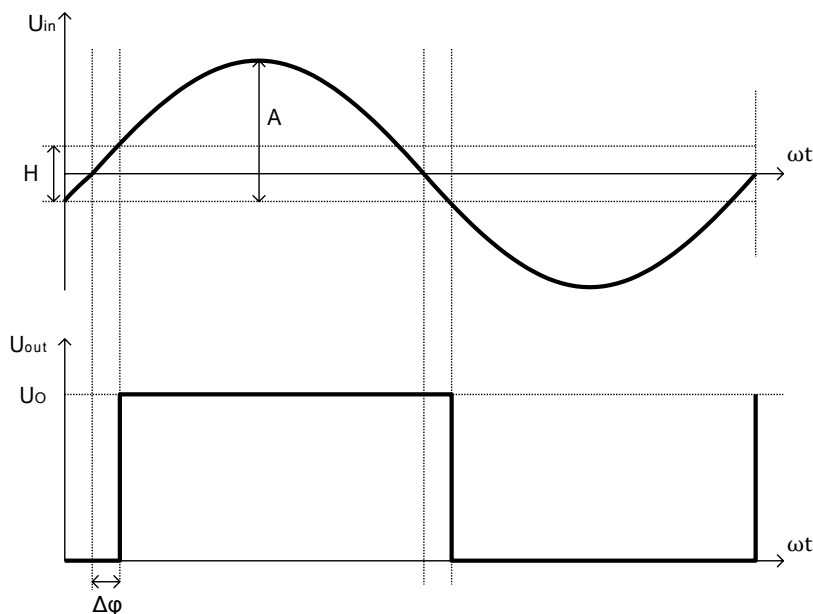


Рис. 2. Влияние гистерезиса на фазовый набег

Не менее значительным источником искажений выходного сигнала цифрового фазового детектора является конечная скорость нарастания и спада выходного напряжения логических интегральных схем (ИС).

Выходное напряжение U_φ измерителя фазы можно определить как:

$$U_\varphi = DC_+ \cdot U_O = \frac{t_{ON}}{T/2} \cdot U_O = \frac{\varphi}{2\pi f} \cdot 2f U_O = \frac{\varphi}{\pi} \cdot U_O, \quad (4)$$

где DC_+ - скважность выходного сигнала ИС;

U_O – выходное напряжение высокого уровня;

t_{ON} – длительность сигнала высокого уровня;

T – период входного сигнала;

f – частота входного сигнала.

Для ИС с нулевым временем переходного процесса t_{tr} произведение длительности сигнала высокого уровня на его величину есть площадь прямоугольника (сигнал U_E на рис. 3.). Для ИС с конечным временем переходного процесса форма выходного сигнала примет вид трапеции (сигнал U_E^*). До тех пор, пока длительность сигнала высокого уровня превышает время переходного процесса, их площади будут равны. В случае меньшей длительности импульса его форма примет вид треугольника, а амплитуда не достигнет значения высокого уровня и будет ограничена значением U_O^* .

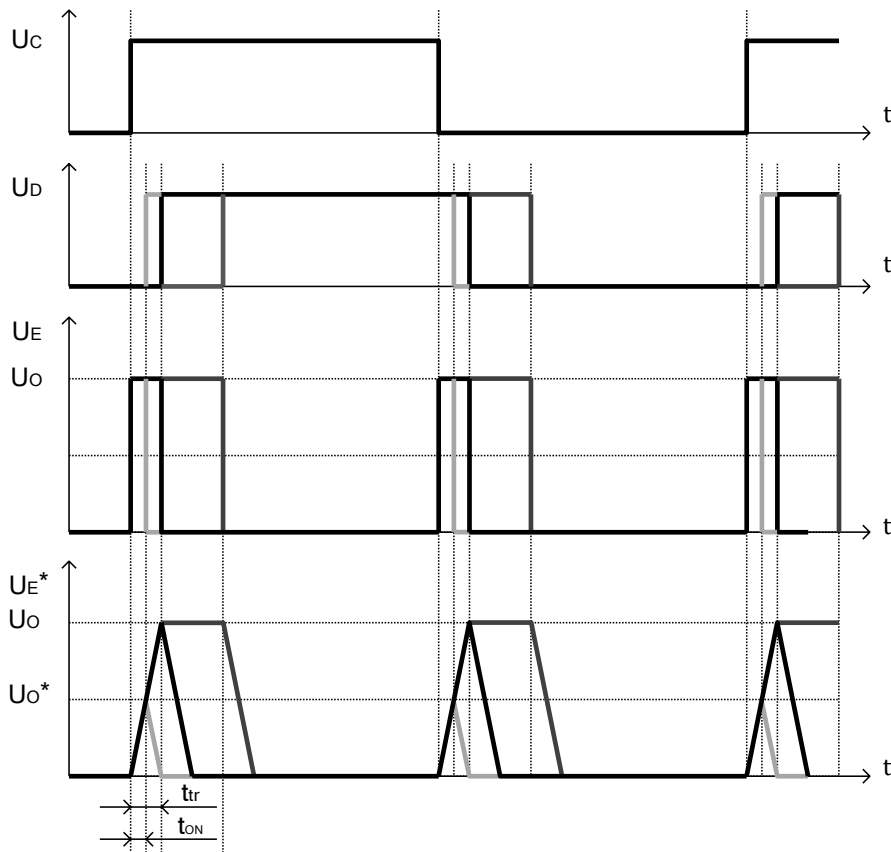


Рис. 3. Временные диаграммы работы детектора при малых углах

Это напряжение можно рассчитать по формуле:

$$U_O^* = \frac{U_O}{t_{tr}} \cdot t_{ON} = \frac{U_O}{t_{tr}} \cdot \frac{\varphi}{\omega}. \quad (5)$$

Площадь треугольника S можно определить следующим образом:

$$S = U_O^* \cdot t_{ON} = \frac{U_O}{t_{tr}} \cdot \left(\frac{\varphi}{\omega}\right)^2. \quad (6)$$

Напряжение U_{φ}^* на выходе ФНЧ при использовании реальных ИС:

$$U_{\varphi}^* = \frac{S}{T/2} = \frac{2}{T} \cdot \frac{U_0}{t_{tr}} \cdot \left(\frac{\varphi}{\omega}\right)^2. \quad (7)$$

Определим соотношение между выходным напряжением фазового детектора построенного на ИС с нулевым временем переходного процесса и на реальных ИС:

$$\frac{U_{\varphi}}{U_{\varphi}^*} = U_0 \frac{\varphi}{\pi} \cdot \frac{t_{tr}\omega^2}{2fU_0\varphi^2} = \frac{t_{tr}\omega}{\varphi} = \frac{\varphi}{\varphi^*}. \quad (8)$$

Искажения выходного сигнала присущие малым измеренным углам также будут наблюдаться и при больших. Условие появления искажений сигнала можно записать следующим образом:

$$\varphi > \pi - \omega t_{tr}. \quad (9)$$

Стоит отметить, что разность фаз между током и напряжением находится в диапазоне $[-\pi/2; \pi/2]$, и условие (9) может наступить только при инвертировании одного из входных сигналов.

Способы повышения точности измерителя фазы можно разделить на:

- аппаратные (использование быстродействующих ИС, применение компараторов с минимальным гистерезисом);
- программные (компенсация скорости нарастания выходного напряжения ИС, компенсация влияния гистерезиса компаратора).

Целью данной работы является разработка алгоритма программной коррекции выходного сигнала измерителя фазы с целью повышения его точности без использования аппаратных методов.

Истинная разность фаз входных сигналов может быть выражена из (8):

$$\varphi^2 = \varphi^* t_{tr} \omega; \quad (10)$$

$$\varphi = \sqrt{\varphi^* t_{tr} \omega}; \quad (11)$$

$$\varphi^* = \pi \frac{U_{\varphi}}{U_0}. \quad (12)$$

Для больших углов формула примет вид:

$$\varphi = \pi - \sqrt{(\pi - \varphi^*) \cdot \omega \cdot t_{tr}} \quad (13)$$

Для компенсации влияния гистерезиса необходимо рассчитать результирующую ошибку. Она будет зависеть от фазового сдвига обоих каналов измерителя.

$$\Delta\varphi_A = \frac{H_A}{2\sqrt{2} \cdot U_{A\text{RMS}}} \quad (14)$$

$$\Delta\varphi_B = \frac{H_B}{2\sqrt{2} \cdot U_{B\text{RMS}}} \quad (15)$$

В случае положительной фазы измеряемого сигнала, гистерезис канала А будет уменьшать скажность выходного импульса в точке Е (рис. 1.), а гистерезис канала В – увеличивать. Скорректированная фаза φ_{res} может быть определена следующим образом:

$$\varphi_{res} = \text{sign}(\varphi) \cdot (|\varphi| - \Delta\varphi_B + \Delta\varphi_A) = \varphi - \Delta\varphi_B + \Delta\varphi_A. \quad (16)$$

При отрицательной фазе:

$$\varphi_{\text{res}} = \text{sign}(\varphi) \cdot (|\varphi| - \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_B) = -\varphi - \Delta\varphi_B + \Delta\varphi_A . \quad (17)$$

Если обобщить формулы (16) и (17) получим:

$$\varphi_{\text{res}} = \text{sign}(\varphi) \cdot |\varphi| - \Delta\varphi_B + \Delta\varphi_A = \text{sign}(\varphi) \cdot |\varphi| + \frac{H_A}{2\sqrt{2} \cdot U_{A \text{ RMS}}} - \frac{H_B}{2\sqrt{2} \cdot U_{B \text{ RMS}}} . \quad (18)$$

С учетом приведенных выше корректирующих формул (11) и (18), предлагаемый алгоритм компенсации ошибок изображен на рис. 4.

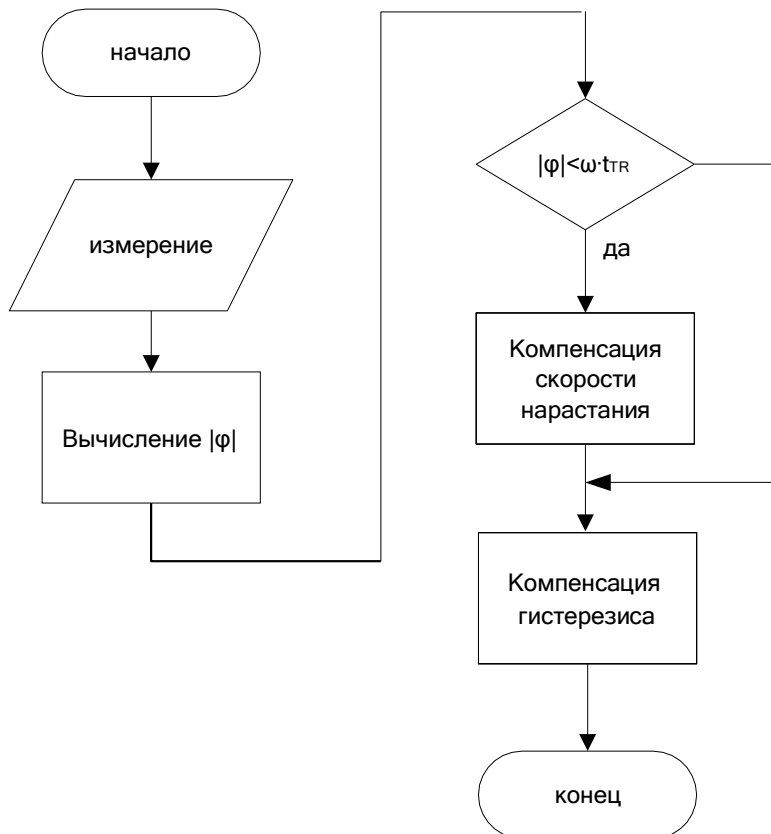


Рис. 4. Алгоритм коррекции выходного сигнала измерителя фазы

Заключение

Разработан алгоритм компенсации искажений выходного сигнала измерителя фазы, реализованного на логических элементах. Предложенный способ позволяет получить высокую точность измерений в широком диапазоне уровней входных сигналов и для любой разности фаз между ними.

Список использованных источников

1. Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич. Оптимизация параметров мобильных антенн ВЧ диапазона // Доклады БГУИР №6 (116), Минск: 2018. С. 73-79.