

А.Ю. ПАНЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук,  
Н.Н. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук

## ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И ПУТЕЙ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

### Введение

В современных радиоэлектронных устройствах используются все более сложные алгоритмы обработки и выделения информации [1]. Однако для их реализации до настоящего времени преобладает или интуитивный выбор схемных решений [2], или несколько устаревшие и чрезвычайно громоздкие методы анализа [3, 4]. Интегральная компонентная база позволяет сосредоточить внимание на конечном результате и использовать более эффективные методы разработки РЭА. Поскольку РЭА предназначена в основном для обработки информационных потоков, то информационные критерии должны доминировать при оценке качества электронных устройств.

В основе ряда методов выделения и передачи информации лежит измерение разности фаз двух сигналов. Поэтому фазовые преобразователи являются одними из широко распространенных устройств, используемых в трактах измерительных приборов, приемников и формирователей сигналов. Обычно фазовые соотношения используются в трактах узкополосных сигналов. Поэтому диапазон частот сигналов на входе лежит существенно выше диапазона частот, несущих полезную информацию, и для прохождения даже небольших объемов информации необходимы компоненты, имеющие высокие значения предельных рабочих частот.

### Информационная оценка фазовых детекторов

В настоящее время используются два основных метода преобразования разности фаз. Первый – преобразование величины фазового сдвига в постоянное напряжение, без ограничения сигнала. Это преобразование может использоваться в формирователях сигналов, в приемопередающих трактах, в излучателях с электрически управляемыми параметрами. При таком преобразовании исходный сигнал может быть полностью восстановлен. Второй – преобразование в цифровой код с использованием ограничения сигнала. В этом случае, без специальных мер, информация об амплитуде сигнала теряется. Этот метод обычно используется в устройствах, которыми оканчивается тракт обработки аналоговых сигналов и далее информация содержится в цифровом коде.

Фазовые преобразователи относятся к классу информационных преобразователей, критерием качества которых является количество передаваемой информации  $I$  [5]. Как известно, при равновероятных сообщениях величина  $I$  в одном сообщении определяется как логарифм отношения диапазона изменения сигнала  $\Delta u$  к погрешности преобразователя  $\delta u$ :

$$I = \ln(\Delta u / \delta u). \quad (1)$$

В цифровых устройствах это эквивалентно числу разрядов преобразователя.

Поток информации  $I_f$  пропорционален скорости прохождения сообщений, и максимальное его значение ограничивается верхней рабочей частотой  $f_{\max}$ . Специфика фазовых измерений состоит в том, что информация содержится во временных параметрах сигналов и ими же определяется скорость передачи сообщений. Если электронный прибор или устройство имеет минимальное время преобразования сигнала  $\tau_{\min}$  или временную погрешность  $\delta\tau$ , то построенный на его основе фазовый детектор при рабочей частоте  $f_p$  ограничит информационный поток величиной

$$I_f = -f_p \ln(\delta\tau f_p). \quad (2)$$

Выражение (2) имеет экстремум, определяющий рабочую частоту, при которой поток информации максимальный:  $f_m = (a \delta \tau)^{-1}$ , где  $a$  – основание логарифма. Для бинарных сообщений  $a = 2$ , поэтому максимальный поток информации обеспечивает фазовая манипуляция, период которой должен не менее, чем в два раза превышать период  $f_p$ . Однако существенная часть энергии такого фазоманипулированного сигнала содержится в гармониках с частотами,  $(2...3)f_p$ , которые тоже должны быть пропущены трактом. Совокупность этих критериев определяет информационные возможности приемопередающих трактов, работающих с фазомодулированными сигналами.

К фазовым детекторам измерительных трактов предъявляются более жесткие требования, поскольку они должны обеспечить передачу информации о непрерывном изменении входной величины.

### Сравнение методов выделения разности фаз

В аналоговых преобразователях фазы используются нелинейность вольтамперных характеристик (ВАХ) электронных приборов [6]. В выходном сигнале нелинейного преобразователя (НП) содержатся все возможные комбинации частот входных сигналов, но только НЧ составляющая, определяемая второй смешанной производной по обоим входным сигналам, содержит полезную информацию. Остальные четные производные приводят к формированию сигнала помехи, которая лежит в диапазоне полезного сигнала и является неустранимой частью погрешности. Нечетные производные формируют спектр высших гармоник, которые ослабляются НЧ фильтром на выходе НП. Таким образом, качество НП зависит от отношения

$$\frac{u_n}{u} = \sum_n \frac{\partial^{2n} u}{\partial u_1^{2n-m} \partial u_2^m} / \frac{\partial^2 u}{\partial u_1 \partial u_2}, \quad (3)$$

где  $u$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  – соответственно выходной и входные сигналы,  $u_n$  – уровень помех.

Для обеспечения минимального отношения (3) современные НП выполняют по схеме перемножителя [6] и выпускают в виде серийных полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС), содержащих устройства стабилизации режимов и буферные преобразователи на входах и выходе. К таким ИМС относятся, например, 525ПС2, 525ПС3 и их зарубежные аналоги MC1595, AD530, AD534 [7]. Схемотехническими методами, тщательной отработкой технологии и подгонкой обеспечивают подавление внеполосных сигналов и синфазной помехи. Их значения указывают в паспортных данных изделия. Однако для использования перемножителей в качестве НП аналоговых фазовых компараторов необходимо знать коэффициент прямого детектирования по каждому входному сигналу, который является существенной составляющей погрешности выходного сигнала. Этот параметр не всегда дается в паспорте. Схема определения коэффициента прямого детектирования изображена на рис. 1.

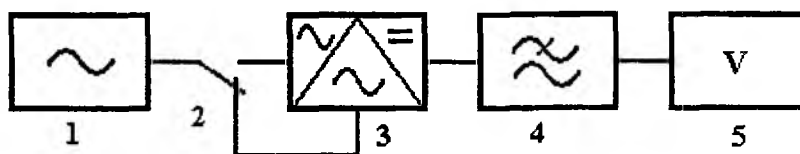


Рис. 1. Схема измерения коэффициента прямого детектирования:

1 – генератор, 2 – переключатель входов ИМС НП, 3 – исследуемая ИМС, 4 – фильтр НЧ, 5 – вольтметр постоянного тока

Временные характеристики фазовых детекторов более жестко ограничивают объем информационного потока. Данная выше оценка (2) относится и к аналоговым фазометрам.

В паспортных данных ИМС указывается верхняя граничная частота  $f_{zр}$  или постоянная времени распространения сигнала  $\tau_p$ . Для оценки погрешности можно считать, что этот фактор обусловлен включением в идеальное устройство RC-цепочки с  $\tau_{RC} = \tau_p$ . Тогда неконтролируемый сдвиг фазы, обуславливающий погрешность НП:

$$\Delta\varphi_n = 2\pi\tau_p f_p = 2\pi f_p / f_{zр} , \quad (4)$$

Требуемая величина погрешности определяет рабочую частоту сигнала для данного типа ИМС.

С другой стороны, величину  $f_p$  ограничивает информационный участок спектра. НЧ-фильтр на выходе НП должен пропустить весь спектр информационного сигнала, но в достаточной степени подавить  $f_p$ . Если используется простейший RC-фильтр, то для отношения напряжения пульсаций  $\Delta u_{вых}$  к выходному напряжению  $u_{вых}$  имеем следующее:

$$\Delta u_{вых} / u_{вых} = (f_p \tau_\phi)^{-1} . \quad (5)$$

Информация об изменении фазового сдвига сигнала  $\varphi_c$  содержится в полосе

$$\Delta f_c = \frac{\partial \varphi_c}{\partial t} . \quad (6)$$

Очевидно, что скорость поступления сообщений ограничивается частотным диапазоном сигналов (6). При этом в каждом сообщении количество информации определяется согласно (4) и (5).

При удовлетворении критериям, которые в первом приближении представлены последовательностью выражений (3) - (6), можно снизить потери информации. Например, оптимизировать параметры тракта обработки фазомодулированных сигналов можно подбором значения  $f_p$ . В ряде случаев для этого нужен перенос исходной частоты сигнала, что может потребовать предварительной обработки информационного и опорного сигналов. При этом технология изготовления РЕА должна обеспечить высокую идентичность временных параметров трактов преобразования обоих сигналов. Неидентичность окажет влияние, аналогичное влиянию времени распространения сигнала  $\tau_p$ .

В фазовых детекторах мгновенные значения сигналов являются промежуточным носителем информации, необходимым для соответствия физической природе электронных устройств. В аналоговых устройствах, проводящих обработку фазы и амплитуды сигнала, существует принципиальная возможность компенсации ограничения (2) перераспределением информационных потоков между этими параметрами. При цифровой обработке сигналов предварительно ограничивают их амплитуду. Потери информации при первичных амплитудно-временных преобразованиях обусловлены скоростью нарастания сигнала на выходе предшествующего преобразователя  $u'_{вых}$ , погрешностью порога переключения  $\Delta u_n$  и временем распространения сигнала. Неконтролируемое время переключения можно оценить как

$$\tau_n = \frac{\Delta u_n}{u'_{вых}} + \tau_p . \quad (7)$$

При одинаковом технологическом уровне изготовления ИМС  $\tau_p$  здесь выше, чем у аналогового НП.

Далее может производиться преобразование информационного сигнала либо в цифровую последовательность, либо в постоянное напряжение. Однако здесь величина пульсаций

выходного напряжения существенно больше, чем при аналоговом преобразовании, поскольку отсутствует подавление сигнала прямого детектирования и нечетных гармоник. Использование таких устройств возможно только при больших отношениях  $f_c \gg \Delta f_c$ .

При прямом преобразовании фазового сдвига в последовательность импульсов их минимальный период можно оценить как

$$T_{\min} = (2...3)\tau_p . \quad (8)$$

Тогда максимальная скорость изменения фазы, которую идентифицирует данный преобразователь, может быть не более чем

$$\frac{\partial \varphi_c}{\partial t} \max < \frac{2\pi}{T_{\min}} . \quad (9)$$

Здесь также необходимо обеспечить идентичность каналов преобразования опорного и информационного сигналов. Частично компенсировать «гонки» сигналов можно при индивидуальном подборе идентичных по временным параметрам ИМС или созданием специализированных ИМС, имеющих два канала с согласованными параметрами.

### Выводы

В работе предложено использовать информационные критерии оценки качества фазовых детекторов. Это обобщенный подход, который наиболее полно учитывает возможности тех или иных схемных реализаций, конструкционных и технологических исполнений. В работе показаны исходные соотношения для основных видов фазоизмерительных устройств. Развитие данного подхода позволит оптимизировать выбор конструкций с позиций минимизации потерь полезной информации.

**Список литературы:** 1. *Лидовский В.В.* Теория информации. М.: Компания Спутник+, 2004. 111 с. 2. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. Т.1: Пер. с англ. М. Гальперин. М.: Мир, 1983. 598 с. 3. *Степаненко И.П.* Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1973. 608 с. 4. *Ногин В.Н.* Аналоговые интегральные микросхемы. М.: Радио и связь, 1992. 400 с. 5. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968. 248 с. 6. *Алексенко А.Г.* Основы микросхемотехники. М.: Юнимедиа-стайл, 2002. 448 с. 7. *Нефедов А.В., Савченко А.М., Феоктистов Ю.Ф.* Зарубежные интегральные микросхемы / Под ред. Ю.Ф.Широкова. М.: КУБКа, 1995. 288 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 20.09.2010*