

деленности, как правило, не представляют интереса, так как практически обычно нужно знать абсолютную величину разности фаз в двух точках.

Итак, при выяснении закона изменения фазы волны при помощи сравнения картин, возникающих при использовании методов темного поля и фазового контраста, следует выяснить ход зависимости  $\alpha(x, y)$  в тех точках, в которых  $\alpha = m\pi$ , либо в тех, где  $\alpha = m\pi - \pi/4$ . Для определения хода зависимости  $\alpha(x, y)$  в других точках достаточно одного из этих методов.

В заключение заметим, что в случае, когда фаза изменяется на  $2\pi$  в интервале, соизмеримом с пространственным разрешением теневого прибора, целесообразно для диагностики использовать метод двухдлинноволновой голографической интерферометрии [2], который позволяет при соответствующем выборе длин волн получать достаточно большие расстояния между линиями равной интенсивности в интерферограмме при «быстром» изменении фазы волны после неоднородности.

При этом, правда, по-прежнему остается проблема неоднозначности при расшифровке интерферограмм, но она легко разрешима. Один из способов ликвидации неоднозначности — повторное использование метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии на других длинах волн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Немтинов В. Б., Рожков О. В. Методы воспроизведения фазово-оптических записей. — В кн.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. М.: Высш. школа, 1977, вып. 8, с. 24—36.
2. Де С. Т., Казачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Измерение параметров рельефа поверхностей методом двухдлинноволновой голографической интерферометрии. — В кн.: Голографические измерительные системы. Сб. науч. трудов/Под ред. А. Г. Козачка. Новосибирск: изд. НЭТИ, 1976.

*Поступило в редакцию 25 января 1980 г.;  
окончательный вариант — 13 января 1981 г.*

УДК 681.325.088.8

О. Г. СМОРЫГО  
(Ярославль)

## СТРУКТУРА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Широкое распространение цифровых измерительных приборов на интегральных схемах требует создания экономичных по потребляемой энергии и дешевых интегральных аналого-цифровых преобразователей, которые в настоящее время являются наиболее дорогими и потребляющими значительную мощность узлами в системах обработки информации [1]. Одно из перспективных направлений с точки зрения создания экономичных АЦП — разработка преобразователей на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) [2].

При построении кодирующих преобразователей на ПЗС могут быть реализованы все основные арифметические операции, проводимые над преобразуемыми и эталонными сигналами, однако точность и быстрота их реализации неравнозначны. Наиболее точно могут быть выполнены операции суммирования и деления зарядов [3]. Операции вычитания и умножения на множитель больше единицы связаны с промежуточным преобразованием информационных зарядов в разность потенциалов, поэтому точность их реализации ниже. Низкая точность операций вычитания и умножения обуславливает необходимость проектирования АЦП на ПЗС преимущественно на основе алгоритмов, использующих только операции сложения и деления. В силу этого наиболее эффективным следует считать метод кодирования, который можно охарактеризовать как симметричный или дифференциальный. Если при симметричном кодировании используется операция суммирования, то осуществляется линейное аналого-цифровое преобразование сигнала  $Q_{пр}$  в пропорциональный позиционный двоичный код  $a_1 a_2 \dots a_n$  в соответствии со следующими соотношениями:

$$Q_{пр} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{a}_i 2^{-(i+1)} Q_0 = 2^{-1} Q_0 + \sum_{i=1}^{n-1} a_i 2^{-(i+1)} Q_0 + \Delta Q_n, \quad (1)$$

$$Q_0 = Q_{пр \max}, \quad |\Delta Q_n| \leq 2^{-n} Q_0, \quad \bar{a}_i = 1 - a_i, \quad a_i = 0, 1, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь  $n$  — число двоичных разрядов АЦП;  $Q_{\text{пр max}}$  — максимальный преобразуемый аналоговый сигнал;  $\Delta Q_n$  — сигнал, соответствующий погрешности преобразования;  $a_i, \bar{a}_i$  — разрядные значения прямого и обратного позиционного двоичного кодов соответственно, вырабатываемые на  $i$ -м этапе сравнения сигналов. Если при симметричном кодировании используется операция деления, то осуществляется функциональное (логарифмическое) преобразование аналогового сигнала в позиционный двоичный код в соответствии с

$$\left( \prod_{i=1}^{n-1} M^{a_i 2^{n-i-1}} \right) Q_{\text{пр}} = \left( M^{2^{n-1}} M^{\delta_n} \prod_{i=1}^{n-1} M^{\bar{a}_i 2^{n-i-1}} \right) Q_{\text{пр max}}, \quad (2)$$

$$\lg M(Q_{\text{пр min}}/Q_{\text{пр max}}) = 2^n, \quad M < 1, \quad |\delta_n| \leq 1,$$

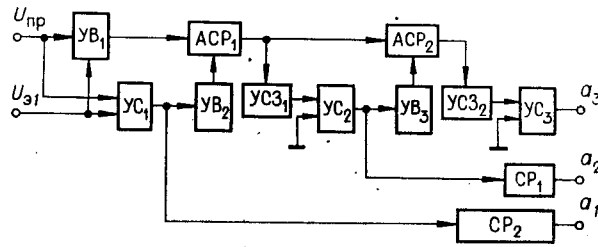
где  $Q_{\text{пр min}}$  — минимальный преобразуемый аналоговый сигнал,  $\delta_n$  — погрешность преобразования.

К схемотехническим особенностям построения АЦП на ПЗС можно отнести некоторые общие положения, вытекающие из детального анализа структур, которые представляют интерес для практической реализации в виде монолитных интегральных схем [4]. Во-первых, процесс преобразования должен быть конвейерным, так как последовательный сдвиг зарядов является основным режимом работы ПЗС. Во-вторых, для повышения точности преобразования необходимо выполнение следующих основных требований при разработке преобразователей: а) в процессе преобразования сравниваемые заряды должны последовательно переноситься друг за другом вдоль общего канала переноса зарядов; б) необходимо осуществлять считывание зарядов для их сравнения только в одном общем считывающем устройстве.

Соотношения (1) и (2), описывающие симметричное аналого-цифровое преобразование, могут быть реализованы в АЦП, структурная схема которого для трех двоичных разрядов приведена на рисунке, где УС — устройство сравнения, СР — сдвиговый регистр, АСР — аналоговый сдвиговый регистр, УВ — устройства выборки и формирования сравниваемых зарядов, УСЗ — устройство считывания зарядов,  $U_{\text{э1}}$  — эталонный сигнал старшего первого разряда, величина которого для линейного и функционального преобразователей равна соответственно  $U_{\text{э1}} = 2^{-1} U_{\text{пр max}}$ ,  $U_{\text{э1}} = M^{2^{n-1}} U_{\text{пр max}}$ . В приведенной структурной схеме отражены основные схемотехнические требования к построению АЦП на ПЗС. Во-первых, преобразуемый  $U_{\text{пр}}$  и эталонный  $U_{\text{э1}}$  сигналы с помощью устройства выборки УВ<sub>1</sub> поочередно преобразуются в пропорциональные порции заряда, которые последовательно переносятся вдоль общих аналоговых сдвиговых регистров АСР<sub>1</sub>, АСР<sub>2</sub>. Во-вторых, сравниваемые заряды считываются с помощью одних и тех же устройств считывания заряда УСЗ<sub>1</sub>, УСЗ<sub>2</sub>, на выходе которых формируется сигнал, пропорциональный разности сравниваемых зарядов [5].

Процесс симметричного линейного аналого-цифрового преобразования (1) происходит следующим образом. Формирование кода начинается со сравнения преобразуемого сигнала  $U_{\text{пр}}$  с первым эталонным сигналом  $U_{\text{э1}}$ . Если преобразуемый сигнал больше первого эталонного, то вырабатывается значение кода старшего разряда  $a_1 = 1$  и следующий эталонный сигнал (заряд) с помощью устройства выборки УВ<sub>2</sub> добавляется к первому. Если преобразуемый сигнал меньше первого эталонного, то вырабатывается значение кода старшего разряда  $a_1 = 0$  и следующий (второй) эталонный сигнал (заряд) добавляется к преобразуемому сигналу. Следовательно, каждый очередной эталонный заряд добавляется к меньшему из сравниваемых зарядов. Процесс симметричного аналого-цифрового преобразования с функциональной зависимостью выходного кода от преобразуемого сигнала (2) отличается от линейного (1) тем, что устройства выборки УВ<sub>2</sub>, УВ<sub>3</sub> осуществляют деление большего из сравниваемых зарядов. Сдвиговые регистры СР<sub>1</sub>, СР<sub>2</sub> служат для задержки цифровых сигналов  $a_1 a_2$ , чтобы на выходе преобразователя одновременно появлялся параллельный код  $a_1 a_2 a_3$ , соответствующий заданной выборке преобразуемого сигнала. Применение сдвиговых регистров позволяет также уменьшить в  $n$  раз время квантования (выборки) преобразуемого сигнала по сравнению со временем преобразования.

Таким образом, основой АЦП на ПЗС является структурная схема, реализующая алгоритм симметричного преобразования и состоящая из аналогового регистра с последовательно-параллельной организацией,  $n - 1$  регистров сдвига цифровых сигналов и  $n$  устройств сравнения.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральные схемы АЦП и ЦАП/Под ред. Л. М. Лукьянова.— М.: Энергия, 1978.
2. Сморгыо О. Г. О возможности построения быстродействующего микроомного АЦП на основе использования ПЗС.— В кн.: Ядерная электроника/Под ред. Т. М. Агаханяна.— М.: Атомиздат, 1979, вып. 10, с. 45—49.
3. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.— М.: Сов. радио, 1976.
4. Сморгыо О. Г. Метод повышения точности АЦП на ПЗС.— В кн.: Ядерная электроника/Под ред. Т. М. Агаханяна.— М.: Атомиздат, 1980, вып. 11, с. 15—18.
5. Terman L. M., Jee J. S. High Sensitivity Charge Comparator for Sensing and Comparing Very Small Charge Packets.— IBM Technical Disclosure Bulletin, 1978, vol. 21, N 3, p. 1262—1263.

*Поступило в редакцию 4 февраля 1980 г.;  
окончательный вариант — 12 ноября 1980 г.*

УДК 621.396

Е. А. КОПЫЛОВ, Ю. В. МАРЧУК  
(Новосибирск)

### ДИСКРЕТНЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Управляемые фазовращатели находят широкое применение в автоматизированных радиоэлектронных системах [1]. Однако на метровых волнах фазосдвигающие линии, используемые в диапазоне СВЧ, становятся велики по размерам, а цепи с сосредоточенными элементами технически трудновыполнимыми. В настоящей работе показана возможность создания малогабаритного фазовращателя с диапазоном изменения фазы  $360^\circ$  и дискретностью  $90^\circ$  на основе бифилярной спиральной линии. Такие линии использовались ранее для целей симметрирования [2], деления мощности [3] и согласования импедансов в широкой полосе частот [4].

Для пояснения принципа действия фазосдвигающей цепи рассмотрим схему, приведенную на рис. 1. Двухпроводная линия длиной  $S_n$ , образованная парой свитых проводов 1 и 2, наматывается в виде спирали на ферритовый сердечник, имеющий форму цилиндра или тора. По отношению к заземленной плоскости спираль может быть представлена как две несимметричные спиральные линии длиной  $S_0$ , образованные из проводов 1 и 2 и имеющие между собой электромагнитную связь [2, 3]. В такой системе могут распространяться независимо два типа волн: синфазный и противофазный. Поле синфазной волны локализовано в пространстве между спиралью и заземленной плоскостью, токи в проводах 1 и 2 одинаково направлены и равны по величине, длина линии с синфазной волной равна длине спирали  $S_0$ . Противофазная волна характеризуется равными и противоположно направленными токами, вследствие чего электромагнитное поле этого типа сосредоточено в малом пространстве между проводами витой линии и слабо взаимодействует с материалом сердечника. Воспользуемся далее результатами работы [2], в которой методом суперпозиции найдены токи в проводах линии, и запишем выражения для выходного напряжения  $U_R$  и входной проводимости  $Y_{вх}$ :

$$U_R = E (R/4W_0 \sin \alpha l_0 - R/W_n \sin \alpha l_n) [i + R(1/4W_0 \operatorname{tg} \alpha l_0 + 1/W_n \operatorname{tg} \alpha l_n)]^{-1}, \quad (1)$$

$$Y_{вх} = (1/4iW_0 \operatorname{tg} \alpha l_0 + 1/iW_n \operatorname{tg} \alpha l_n) - [R(1/4iW_0 \sin \alpha l_0 + 1/iW_n \sin \alpha l_n)^2 / (1 + R(1/4iW_0 \operatorname{tg} \alpha l_0 + 1/iW_n \operatorname{tg} \alpha l_n))], \quad (2)$$

где  $E$  — напряжение источника входного сигнала, фаза которого условно принята за нуль;  $\alpha = \omega/c$  ( $\omega$  — частота,  $c$  — скорость света);  $W_0$  — волновое сопротивление линии на синфазном типе волны;  $W_n$  — волновое сопротивление линии на противофазном типе волны.

В дальнейшем нам потребуются следующие соотношения:

$$W_0 = \sqrt{L_0/C_0}, \quad l_0 = S_0 c \sqrt{L_0 C_0}; \quad (3)$$

$$W_n = \sqrt{L_n/C_n}, \quad l_n = S_n c \sqrt{L_n C_n}. \quad (4)$$

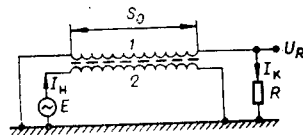


Рис. 1. Схема фазосдвигающей цепи.