

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Грибанов, Г. П. Веселова, В. П. Андреев. Автоматические цифровые корреляторы. М., «Энергия», 1971.
2. Г. Я. Мирский. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М., «Энергия», 1972.
3. А. Ф. Романенко, Г. А. Сергеев. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М., «Советское радио», 1968.

*Поступила в редакцию 5 июля 1973 г.;
окончательный вариант — 18 января 1974 г.*

УДК 681.355 : 681.325.05

В. В. БРАТКЕВИЧ, В. Г. ГАЛАЛУ, А. П. СТАХОВ

(Таганрог)

СТРУКТУРА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Использование цифровых вычислительных машин в системах управления сложными объектами и для автоматизации научного эксперимента выдвинуло в качестве важнейшей практической задачи проблему создания быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с достаточно высокими точностными характеристиками. Однако в реальных системах управления на входы АЦП воздействуют помехи, причем влияние помех оказывается тем сильнее, чем более высокими скоростными и точностными характеристиками обладает АЦП, в связи с чем при проектировании современных АЦП необходимо предъявлять весьма высокие требования и к их помехоустойчивости.

По-видимому, не будет преувеличением утверждать, что в современных условиях проблема помехоустойчивости АЦП выдвинулась на передний план и остается одной из важнейших проблем техники аналого-цифрового преобразования и в предвидимом будущем.

Известные методы борьбы с помехами при аналого-цифровом преобразовании информации условно можно разбить на две группы.

1. Интегростатистические методы, использующие идеи усреднения, интегрирования, фильтрации. При этом борьба с помехами ведется или с помощью аналоговых фильтров на входе АЦП (примером являются интегрирующие (АЦП), или с помощью цифровых фильтров, основанных на машинной обработке информации, поступающей из АЦП.

2. Детерминированные (алгоритмические) методы борьбы с помехами, связанные с построением специальных избыточных алгоритмов аналого-цифрового преобразования, позволяющих за счет избыточности обнаруживать и корректировать ошибки, возникающие при аналого-цифровом преобразовании.

Наибольшее распространение получили интегростатистические методы повышения помехоустойчивости. Недостатком этих методов является сравнительно большое время, затрачиваемое на обработку ансамбля преобразованных значений аналоговой величины. В тех случаях, когда требуется обеспечение высокого быстродействия АЦП при высокой помехоустойчивости процесса преобразования, предпочтительнее алгоритмические методы борьбы с помехами.

В литературе описаны структуры АЦП, реализующие помехоустойчивые алгоритмы аналого-цифрового преобразования [1]. Одним из путей создания помехоустойчивых структур АЦП является использование результатов теории (i, k, s) -алгоритмов [2, 3]. В настоящей статье предлагается и анализируется структура помехоустойчивого АЦП, реализующего оптимальный $(i, 1, 1)$ -алгоритм с отдыхающим индикаторным элементом [3]. Суть этого алгоритма заключается в следующем. Аналого-цифровое преобразование осуществляется поразрядно, начиная со старшего разряда, причем вес l -го разряда вычисляется по следующему рекуррентному соотношению:

$$\varphi_p(l) = \varphi_p(l-1) + \varphi_p(l-p-1) \quad (1)$$

при начальных условиях $\varphi_p(0) = 1$ и $\varphi_p(j) = 0$ для всех $j < 0$, где $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$; n — номер двоичного разряда; $p = 0, 1, 2, \dots, m-1$; m — характеристическое число алгоритма.

Каждому p соответствует некоторый алгоритм двоичного поразрядного кодирования. Например, при $p = 0$ рекуррентное соотношение (1) принимает вид

$$\varphi_0(l) = 2\varphi_0(l-1), \quad (2)$$

а его решением является функция $\varphi_0(l) = 2^l$, т. е. при $p = 0$ рассматриваемый алгоритм представляет собой классический алгоритм двоичного поразрядного кодирования. При $p = 1$ выражение (1) принимает вид известного уравнения Фибоначчи [4]

$$\varphi_1(l) = \varphi_1(l-1) + \varphi_1(l-2). \quad (3)$$

В табл. 1 приведены ряды чисел, являющихся решением рекуррентного соотношения (1) при различных значениях p .

Рассмотрим структуру аналого-цифрового преобразователя, использующего в качестве весов двоичных разрядов числа Фибоначчи ($p = 1$). Функциональная схема устройства приведена на рис. 1. В состав устройства входят: двухфазный генератор тактовых импульсов Γ ; $(t+2)$ -разрядный распределитель тактовых импульсов, выполненный на базе регистра сдвига (t — количество кодируемых разрядов АЦП); основной регистр результата $T_{1-2} - T_{5-2}$ со схемами совпадения &5—&9; контролирующее устройство, состоящее из вспомогательного регистра результата $T_{1-1} - T_{5-1}$, из схем совпадения &1—&4, схемы сборки 1—1 и триггера T_6 ; преобразователь код-напряжение (ПКН); устройство сравнения (УС).

Рассмотрим работу АЦП для случая, когда он состоит из пяти двоичных разрядов, весовые коэффициенты которых, начиная со старшего (левого на рис. 1), соответственно равны 5, 3, 2, 1, 1. Диапазон измерения при этом равен 8 квантам. Предположим, что измеряемая величина U_x равна 7 квантам и в процессе преобразования не изменяется. Начало работы устройства синхронизируется фазой Γ_2 генератора тактовых импульсов. При поступлении запускающего импульса «Пуск»

Таблица 1

l	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varphi_0(l)$	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
$\varphi_1(l)$	1	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89
$\varphi_2(l)$	1	1	1	2	3	4	6	9	13	19	28
$\varphi_3(l)$	1	1	1	1	2	3	4	5	7	10	14
$\varphi_4(l)$	1	1	1	1	1	2	3	4	5	6	8

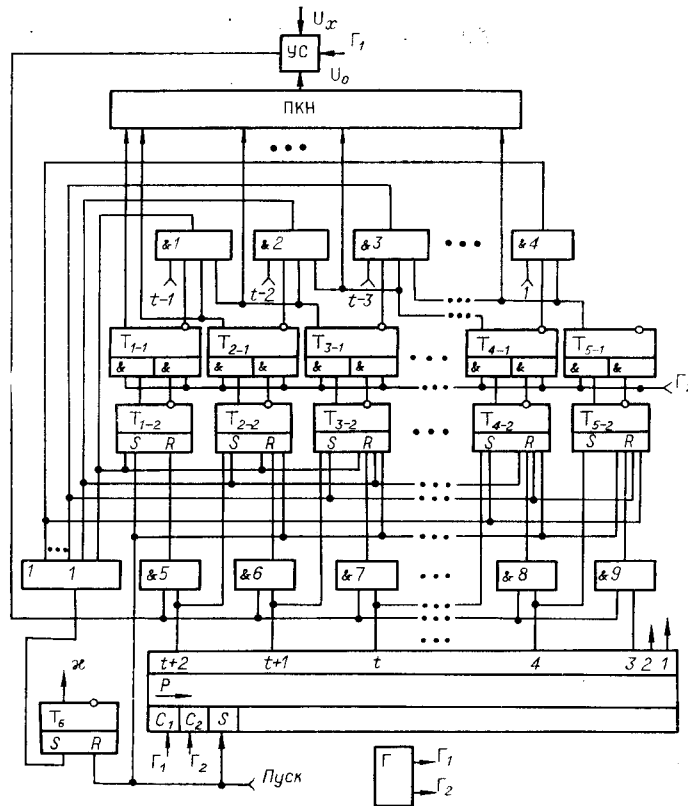


Рис. 1.

синхронно с фазой Γ_2 триггеры основного регистра $T_{1-2}—T_{5-2}$ и вспомогательного регистра $T_{1-1}—T_{5-1}$ устанавливаются в исходное состояние 10000. На выходе ПКН формируется вес старшего разряда, равный 5. В следующем полутакте на шине Γ_1 происходит опрос УС и формирование первого продвигающего импульса в распределителе тактовых импульсов. Так как результат сравнения $U_x=7$ больше $U_0=5$, что соответствует отсутствию сигнала на выходе УС, то триггер T_{1-2} основного регистра останется в единичном состоянии и в последующий триггер T_{2-2} запишется «1». Во втором полутакте первого такта сравнения код 11000 из основного регистра перепишется во вспомогательный. Аналогичным образом кодируются и последующие двоичные разряды, при этом работа устройства практически повторяет функционирование классической структуры АЦП поразрядного кодирования. Отличие заключается лишь в изменении весовых коэффициентов кодируемых разрядов и перезаписи в каждом такте содержимого основного регистра результата во вспомогательный. Учитывая это, дальнейшую работу АЦП представим табл. 2.

Результат преобразования 10100 формируется в конце 5-го такта сравнения в основном регистре результата. Последующие два такта состоят только в работе контролирующего устройства, для чего на выходах 2 и 1 Р формируются управляющие сигналы, которыми опрашиваются соответственно схемы &3 и &4. При этом никаких изменений в схеме не происходит.

Для пояснения работы контролирующего устройства предположим, что в первом такте сравнения произошел сбой триггера T_{1-2} , либо на входе АЦП возникла однотактная отрицательная импульсная помеха $U_{\text{н}}$. Тогда по аналогии с рассмотренным примером работу устройства

Таблица 2

Номер такта	Операция сравнения	Содержимое основного регистра	Эквивалент U_0
0	—	10000	5
1	$U_x \geq U_0$	11000	8
2	$U_x < U_0$	10100	7
3	$U_x \geq U_0$	10110	8
4	$U_x < U_0$	10101	8
5	$U_x < U_0$	10100	7

Таблица 3

Номер такта	Операция сравнения	Содержимое основного регистра	Эквивалент U_0
0	—	10000	5
1	$U_x < U_0 + U_{\text{п}}$	01000	3
2	$U_x > U_0$	01100	5
3	$U_x > U_0$	01110	6
4	$U_x > U_0$	01111	7
5	$U_x > U_0$	01111	7

представим табл. 3. Здесь, несмотря на ошибку, конечный результат преобразования является истинным, причем по виду кода можно определить были ли ошибки в течение цикла преобразования. Действительно, формирование в двоичной последовательности, образующей конечный результат, группы соседних единиц происходит, учитывая (3), только при наличии ошибок преобразования, причем каждая группа соседних единиц служит признаком только одной ошибки. Поскольку в системе счисления (3) одному значению измеряемой величины соответствуют различные наборы кодовых эквивалентов (в зависимости от того, были ли ошибки в течение цикла преобразования или нет), то для дальнейшей обработки результатов преобразования последние необходимо представить в единственной форме, которую назовем нормальной. Признаком нормальной формы служит наличие не менее одного нуля справа от любой единицы кода. Очевидно, что результат преобразования, если не было ошибок в течение цикла преобразования, всегда будет представлен в нормальной форме, в противном случае вид кода отличается от нормального и для преобразования кода к нормальной форме необходимо заменить согласо (3) все соседние пары единиц, одной единицей, записанной в следующем за ними старшем разряде. Контролирующее устройство в рассматриваемой структуре обеспечивает, с одной стороны, обнаружение ошибок преобразования, при этом признак λ -обнаружения ошибки запоминается в триггере T_6 , и, с другой — преобразование конечного результата к нормальной форме. Схемы &1—&4 необходимы для последовательного, начиная со старших разрядов, выявления комбинации 011, записанной в соседних триггерах регистра результата, и последующей замены на эквивалентную ей комбинацию 100. Для устранения состязаний между триггерами регистра результата в структуру АЦП введен вспомогательный регистр.

Работа контролирующего устройства начинается с 4-го такта сравнения, т. е. сразу же после кодирования трех старших разрядов. При этом на $(t-1)$ выходе распределителя P формируется разрешающий потенциал, которым стробируется схема &1. Так как в триггерах T_{1-1} — T_{3-1} в четвертом такте сравнения записан код 011, то на выходе &1 формируется импульс, который устанавливает триггер T_6 в единичное состояние, а в триггеры T_{1-2} — T_{3-2} записывает код 100. Во втором полутакте четвертого такта сравнения код 10011 переписывается во вспомогательный регистр. В последующих тактах аналогично стробируются схемы &2—&4, при этом срабатывает &3 и код в основном регистре результата изменяется с 10011 на 10100. Таким образом, несмотря на ошибку, конечный результат преобразования всегда будет пред-

ставлен в нормальной форме, а в триггере T_6 записан признак обнаружения ошибки.

Рассмотренная структура позволяет исправлять не только любую единичную ошибку преобразования, возникающую от сбоя с 1 на 0 одного из триггеров регистра результата или от воздействия на входные цепи АЦП однократной однополярной (в рассмотренном примере — отрицательной) импульсной помехи, но и большое количество ошибок, возникающих от многократных воздействий сбоев или импульсных помех. Однако в этом случае вид кода конечного результата преобразования отличается от нормального, что в сочетании с признаком обнаружения ошибки говорит о наличии многократных ошибок в течение цикла преобразования. Действительно, пусть диапазон измерения равен (0—34) квантов и АЦП содержит восемь двоичных разрядов с весами 21, 13, 8, 5, 3, 2, 1, 1. Если кодируемая величина $U_x=21$ кванту, то при отсутствии ошибок результат преобразования — 10000000. Предположим, что в течение процесса кодирования происходят сбои с 1 на 0 первого, начиная со старшего, третьего, пятого и седьмого триггеров регистра результата, либо на входные цепи АЦП воздействует серия однократных однополярных импульсных помех. Тогда по аналогии с рассмотренными примерами результат преобразования после восьми тактов сравнения равен 01010101, а учитывая два дополнительных такта работы контролирующего устройства, окончательно получим 01010110. Таким образом, несмотря на сбой в половине триггеров регистра, конечный результат преобразования является истинным.

Для оценки помехоустойчивости рассмотренной структуры АЦП последняя моделировалась на ЦВМ. На вход модели подавалась аддитивная смесь входного сигнала и помехи с равномерным законом распределения амплитуд (в диапазоне $0 \div \varphi(i) - 1$) и равномерным законом распределения момента возникновения помехи. Длительность помехи задавалась равной $m=1, 2, 3$ тактов сравнения, абсолютные значения погрешности преобразования для положительных и отрицательных помех накапливались отдельно.

На рис. 2 представлены усредненные (для каждого цикла преобразования) приведенные значения погрешности при воздействии положительных помех для структуры помехоустойчивого АЦП ($p=1$) и классической структуры поразрядного кодирования ($p=0$). Результаты моделирования показывают, что для диапазона преобразования $\varphi(i)=128$ при воздействии положительных помех длительностью в 1 такт помехоустойчивый АЦП обеспечивает в 2,2 раза меньшую по сравнению с классическим алгоритмом приведенную погрешность преобразования.

При воздействии отрицательных помех длительностью в 1 такт структура с $p=1$ обеспечивала получение истинных результатов во всех случаях, в то время как приведенная погрешность для классического алгоритма поразрядного кодирования ($p=0$) оставалась равной (вследствие симметричности алгоритма) приведенной погрешности для случая положительных помех.

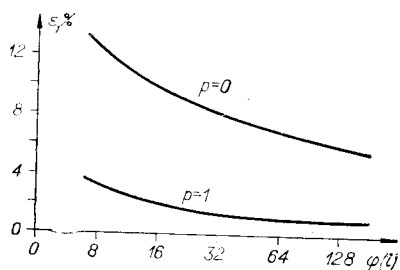


Рис. 2.

Эффективность сглаживания помех длительностью 2 и 3 такта у рассмотренной структуры также значительно больше (в 2—3 раза).

Следует отметить, что рассмотренная структура по сравнению с классической имеет меньшее быстродействие (~ в 1,5 раза) и требует большего расхода оборудования (~ на 40%). Однако быстродействие помехоустойчивого АЦП может быть существенно

(примерно вдвое) увеличено за счет использования следующих особенностей алгоритма: а) выходное напряжение ПКН носит более плавный характер, вследствие чего время, отводимое для одного такта сравнения, может быть уменьшено; б) ошибки в предыдущих ходах корректируются последующими.

При этом выборе длительности одного такта сравнения и характеристического числа p -алгоритма, определяющих длительность подавляемых помех, должен предшествовать статистический анализ импульсных помех на входе устройства сравнения, целью которого является определение закона распределения импульсных помех.

Экспериментальное исследование макета 13-разрядного помехоустойчивого АЦП ($\varphi(i) = 377$) подтвердило результаты моделирования. В частности, были получены истинные результаты при воздействии отрицательных помех длительностью в 1 такт и при имитации выхода из строя одного или нескольких (несмежных) триггеров регистра результата или разрядов ПКН.

Разработанный макет имеет следующие технические характеристики: длительность цикла преобразования, включая работу контролирующего устройства, 13 мкс; статическая погрешность преобразования 0,4%; диапазон преобразуемых напряжений $\pm 2,5$ В.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Алексеев, А. Н. Касперович, Б. В. Карпюк. Помехоустойчивый двухканальный аналого-цифровой преобразователь.— В кн.: Труды семинара «Аналого-цифровые преобразователи». Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1971.
2. И. В. Витенько, А. П. Стахов. Теория оптимальных алгоритмов аналого-цифрового преобразователя.— В кн.: Приборы и системы автоматки. Вып. 11. Харьков, Изд. ХГУ, 1970.
3. А. П. Стахов, В. В. Браткевич. Структурный синтез аналого-цифровых преобразователей, реализующих оптимальные (i, k, s) -алгоритмы преобразования.— В кн.: Проблемы создания преобразователей формы «информации». (Материалы II Всесоюзного симпозиума). Киев, «Наукова думка», 1973.
4. Н. Н. Воробьев. Числа Фибоначчи. М., «Наука», 1969.

*Поступила в редакцию 15 февраля 1973 г.;
окончательный вариант — 23 января 1974 г.*

УДК 681.142.621

**В. А. БЕЛОМЕСТНЫХ, В. Н. ВЬЮХИН, А. Н. КАСПЕРОВИЧ,
Н. В. ЛИТВИНОВ, В. И. СОЛОНЕНКО**

(Новосибирск)

КОНВЕЙЕРНЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Одной из основных задач техники аналого-цифрового преобразования является повышение быстродействия. В настоящее время быстродействие АЦП определяется двумя параметрами: максимальной частотой измерений F_{\max} (или временем $T_d = 1/F_{\max}$) и апертурным временем T_a .

Значение времени T_d определяет погрешность восстановления сигнала по его дискретным отсчетам. При кусочно-линейной аппроксимации (полиномом 1-го порядка) значение T_d может быть записано в виде [1]

$$T_d = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{8\delta_1}, \quad (1)$$