

АЦП с контуром фазовой автоподстройки частоты

Михаил Сизов (Москва)

В статье описывается новый тип АЦП – АЦП с контуром фазовой автоподстройки частоты (АЦП с ФАПЧ). Описывается функциональная структура разработанного устройства. Дается представление об особенностях эксплуатации АЦП с ФАПЧ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка электронных устройств без микроконтроллеров (МК) и аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) невозможна. АЦП, входящие в МК, иногда не удовлетворяют требованиям по точности и шумам. В связи с этим предлагается новый тип АЦП – АЦП с контуром фазовой автоподстройки частоты, которого нет в принятой в учебной литературе классификации АЦП. В интернете легко найти описание этого устройства, если набрать в поисковике «АЦП с ФАПЧ». Среди найденных материалов будет, например, статья «Преобразователь напряжения в длительность импульса, стабилизированный ФАПЧ» [1] и другие публикации. Возможности АЦП с ФАПЧ проверены и представлены в таблице 1.

Результаты испытаний, опубликованные в 2012 г., получены на макете АЦП с ФАПЧ, в котором использовались стандартные логические микросхемы, операционный усилитель (ОУ) и 8-разрядный микропроцессор «ATmega16». В 2015 г. была изготовлена и испытана в составе 2-канального АЦП микросхема 2-канального ФАПЧ (БМК серии 5503), изготовитель НПК «Технологический центр» г. Зеленоград. Задание, в виде принципиальной электрической схемы ФАПЧ, было выдано Научно-производственным подразделением «ДОЗОР». На рисунке 1 показан корпус микросхемы.

Один такой корпус заменяет более 30 корпусов стандартных логических

элементов, которые входят в состав ФАПЧ и служат для построения его компонентов: фазовый детектор – ФД, генератор, управляемый напряжением – ГУН, четырёхразрядный счётчик-делитель, который включается между выходом ГУН и входом ФД. Счётчик делит выходную частоту ГУН в 16 раз, тем самым он усредняет шумы ГУНа, в результате чего уменьшаются шумы АЦП. В новой версии БМК 5503ХМ1У-6хх в состав ФАПЧ будут входить операционные усилители, такая микросхема (в том же корпусе) должна появиться в этом году. В настоящее время на предприятии изготавливают, для летающей лаборатории, 15-канальную систему сбора информации на базе 32-разрядного микроконтроллера 1986ВЕ1Т и АЦП с ФАПЧ.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АЦП С ФАПЧ

В предлагаемом устройстве используется промежуточное преобразование аналогового сигнала (напряжения) в длительность импульса с помощью контура ФАПЧ [1]. Подробные описания принципа работы ФАПЧ можно найти в интернете [2, 3]. Ближайшим прототипом АЦП с ФАПЧ, по составу, является синтезатор, который позволяет получить сетку стабильных частот. Одним из применений синтезаторов является использование их в качестве опорных генераторов в преобразователях частоты и в электронных музыкальных инструментах.

На рисунках 2 и 3 показаны функциональные схемы синтезатора и АЦП с ФАПЧ, соответственно.

Предлагаемая схема АЦП с ФАПЧ содержит элементы синтезатора, но в другом включении, и дополнительные элементы (на схеме обведены пунктиром):

- источник опорного напряжения – обязательный элемент АЦП, амплитуда выходных импульсов ФД равна опорному напряжению (U_p), а длительность импульсов T_x равна фазовому сдвигу между сигналами F_1 и F_0 ;
- фильтр низкой частоты (ФНЧ) выполнен по схеме пропорционально-интегрирующего (ПИ) фильтра с дополнительным входом для подключения внешнего сигнала (U_x), который будет преобразован, сначала, в длительность импульса, а потом – в двоичный код;
- ПИ-фильтр делает систему ФАПЧ астатической, т.е. установившееся, среднее значение напряжения выходного сигнала ФД ($U_{ФД}$) и входного сигнала U_x всегда равны. За счёт интегратора и отрицательной обратной связи напряжение на входе ГУН поддерживается таким, чтобы частоты сигналов F_1 и F_0 были равными, а фазовый сдвиг T_x между сигналами F_1 и F_0 определяется выражением:

$$T_x = T_1 \times U_x / U_p,$$

где T_1 – период частоты F_1 , U_x – входное напряжение, U_p – опорное напряжение АЦП;

- ОЗУ хранит текущее значение двоичного кода, запись кода производится в момент переднего фронта импульса сигнала F_0 ;
- Фазовый детектор (ФД) импульсного типа выполнен на логических эле-

Таблица 1. Варианты АЦП с ФАПЧ

Полоса пропускания АЦП, Гц	Число разрядов АЦП	Частота преобразования, Гц	Максимальное значение кода АЦП
2	24	10	14 000 000
10	22	50	2 800 000
20	21	100	1 400 000
80	19	400	350 000
200	18	1000	140 000
800	16	4000	35000

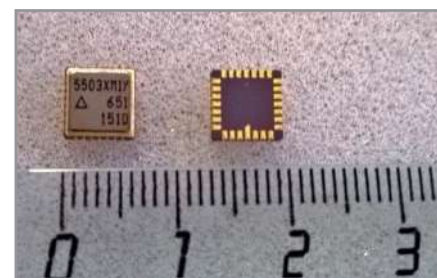


Рис. 1. Корпус микросхемы 5503ХМ1У 651

ментах и имеет линейную выходную фазовую характеристику для обеспечения высокой точности преобразования.

Выходным сигналом синтезатора является переменное напряжение определённой формы и требуемой частоты $F_{гун} = N \times F_1$. К этим параметрам предъявляются высокие требования к точности и их стабильности.

В АЦП с ФАПЧ сигналы двух генераторов частот F_1 и F_0 являются внутренними, их форма напряжений должна быть прямоугольной, чтобы обеспечить работу ФД импульсного типа. Так как ФД определяет временной интервал между передними фронтами импульсов F_1 и F_0 , то скважность импульсов F_1 и F_0 не влияет на точность измерения фазового сдвига.

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ 2-х КАНАЛЬНОГО АЦП С ФАПЧ

На рисунке 4 показана блок-схема первого канала ФАПЧ на микросхемах 653 и 503. Микросхема 503 – это БМК, в который входят 8 операционных усилителей с однополярным питанием +5 В. Как уже говорилось, в новой версии БМК 5503XM1Y-6xx ОУ будут входить в состав ФАПЧ.

На рисунке 5 показана диаграмма совместной работы ФАПЧ и микропроцессора (МК) 1986ВЕ1. Для преобразования длительности выходных импульсов ФАПЧ используются четыре канала Таймера 1 МК 1986ВЕ1, которые запрограммированы следующим образом:

- первый канал работает в режиме ШИМ и формирует сигнал F_1 с периодом 2500 мкс (400 Гц). Тактовая частота МК 80 МГц ($t_{clk} = 12,5$ нс). В периоде сигнала F_1 содержится 200 000 отсчётов частоты МК;
- второй, третий и четвёртый каналы Таймера 1 работают в режиме «Захвата» («Capture»). На входы этих каналов поступают импульсные сигналы частотой 400 Гц, длительности которых пропорциональны входным напряжениям U_{x1} , U_{x2} и U_{x3} , соответственно. Так как начало этих импульсов совпадает с началом работы счётчика Таймера 1 (код 0x0000), то в момент окончания импульса происходит считывание «на лету» состояния счётчика в специальный регистр памяти МК. В каждом канале Таймера есть два регистра памяти, в которые мож-

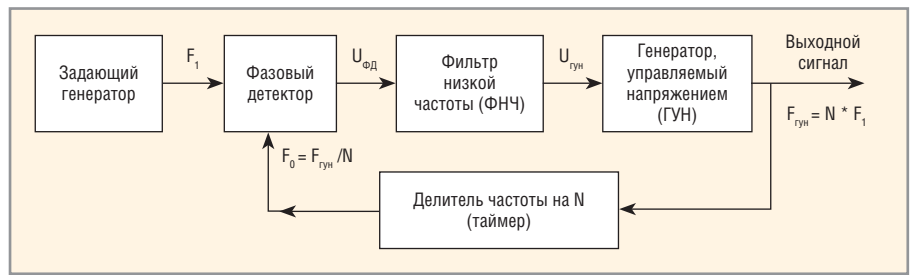


Рис. 2. Функциональная схема синтезатора частоты

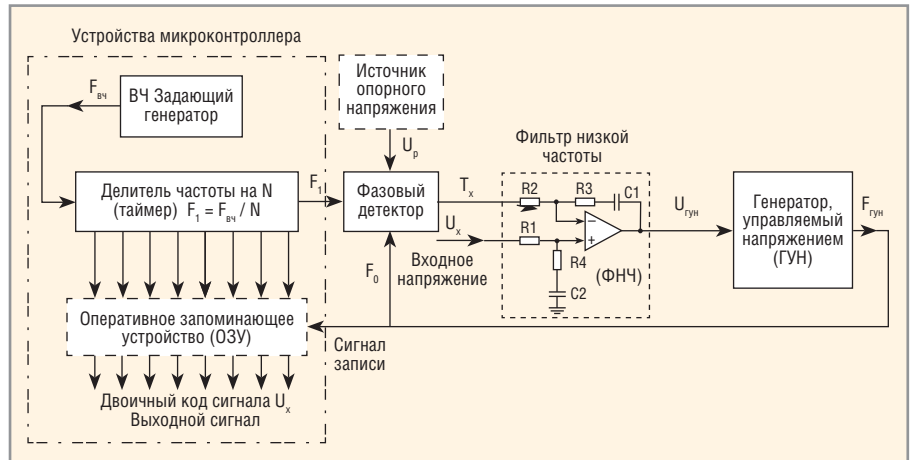


Рис. 3. Функциональная схема АЦП с ФАПЧ

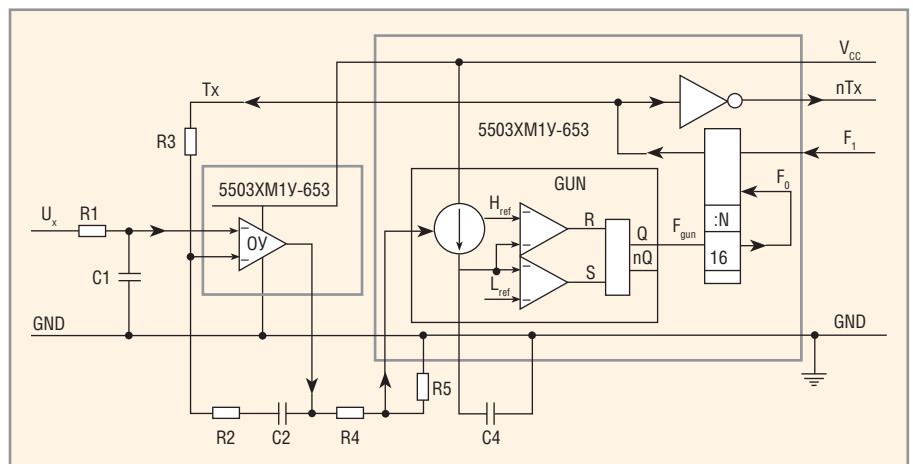


Рис. 4. Блок-схема первого канала ФАПЧ на микросхемах 653 и 503

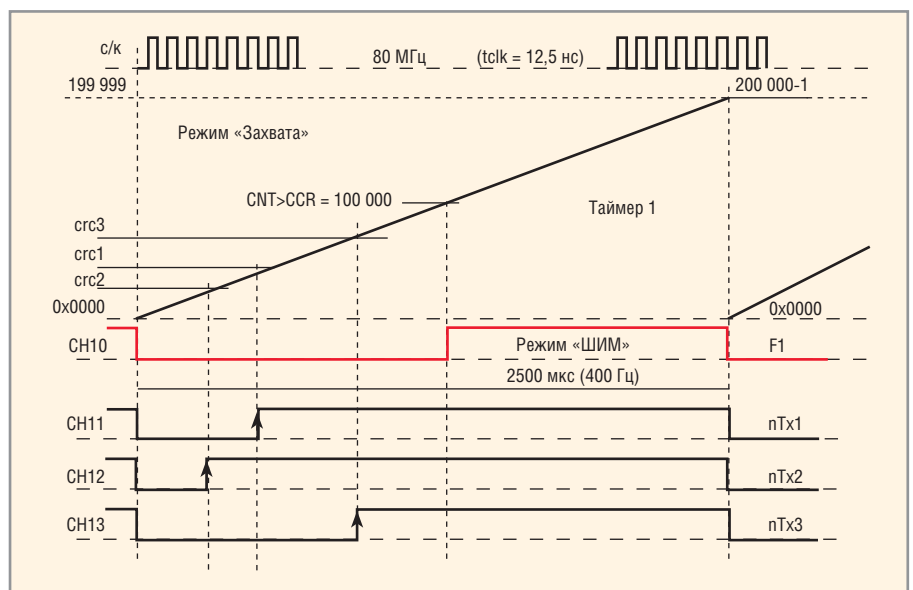


Рис. 5. Диаграмма совместной работы ФАПЧ и микропроцессора (МК) 1986ВЕ1



Рис. 6. Плата 15-канального АЦП с ФАПЧ

но записать коды начала и конца импульса, это исключит ошибки, связанные с задержкой формирования сигнала F_1 . Точное значение кода входного напряжения U_x равно разности между кодами конца и начала импульса. МК 1986ВЕ1 содержит ещё три Таймера, которые также могут работать в режиме «Захвата», обеспечивая параллельное (независимое) преобразование 15 аналоговых сигналов в код.

В таблице 2 приведены параметры 15-канальной системы сбора информации на базе 32-разрядного микроконтроллера 1986ВЕ1Т и АЦП с ФАПЧ. На рисунке 6 показан внешний вид разработанной системы.

Факторы, определяющие точность АЦП с ФАПЧ

АЦП с ФАПЧ является следящей системой с астатизмом второго порядка. Установившееся значение ошибки в таких устройствах равно нулю, а точнее напряжению смещения на входе ОУ равно $+U_x / K_{осс}$ (коэффициент ослабления синфазной составляющей ОУ).

Например, ОУ 140УД31АТ, имеющий входное напряжение смещения 25 мкВ и коэффициент ослабления синфазной составляющей более 110 дБ, гарантирует преобразование напряжения $U_x = 5$ В в длительность импульсов с погрешностью менее 0,002%. Номиналы резисторов R1 и R3 (см. рис. 3) должны быть одинаковыми ($\pm 5\%$), для компенсации входных токов ОУ. Элементы R2, R4, C1 и C2 не влияют на точность АЦП, они влияют на динамические характеристики преобразователя.

У многих вызывает сомнение, что АЦП с ФАПЧ может устойчиво работать и с такой точностью. Действительно, на входе ОУ сравниваются два сигнала, постоянное напряжение и прямоугольные импульсы разной скважности. Но, если посмотреть осциллограммы напряжений (см. рис. 7) на входах $+U_x$ (жёлтый луч) и $-U_x$ (голубой луч) операционного усилителя, то мы увидим, что два луча сливаются в одну линию. Это результат действия двух цепей отрицательной обратной связи (ООС). Первая цепь по постоянному току через резистор R3, вторая цепь по переменному току через резистор R4 и конденсатор C2. ОУ, имеющий большой коэффициент усиления ($> 100\,000$), делают всё возможное, чтобы напряжения на входах («+» и «-») были равными, с точностью до мкВ. Выходное напряжение ОУ имеет сложную форму, обеспечивая постоянный уровень напряжения на входе $-U_x$ ОУ, равный напряжению на входе $+U_x$. Происходит ослабление всех нелинейностей элементов схемы,

охваченных отрицательной обратной связью.

Поверить, что прямоугольный импульс превращается в постоянное напряжение за счёт ООС, очень трудно, но это действительно так. Осциллограммы для разных уровней входного напряжения (1, 2 и 4 В), показанные на рисунках 7а, 7б и 7в, подтверждают это.

Напряжение на выходе ОУ управляет частотой и фазой ГУН. Так как ГУН является вторым интегрирующим элементом в контуре ФАПЧ, то он реагирует только на постоянную составляющую этого сложного по форме сигнала.

Разрешающая способность АЦП с ФАПЧ

Сигналом обратной связи в схеме АЦП является выходной сигнал ФД. Это прямоугольный импульс, площадь которого (среднее значение напряжения за период частоты преобразования F_1) равна входному напряжению U_x . ФД выполнен на элементах БМК, которые имеют время переключения порядка 1 нс. ФАПЧ – это аналоговое устройство. Длительность выходного импульса ФД может изменяться с шагом и менее 1 нс, но надёжно измерить длительность импульса можно только с шагом более 1 нс. Например, 2 нс.

На диаграмме совместной работы ФАПЧ и микропроцессора (см. рис. 5) видно, что тактовая частота МК определяет разрешающую способность АЦП с ФАПЧ. В данном примере тактовая частота МК 80 МГц обеспечивает 200 000 отсчётов на частоте преобразования $F_1 = 400$ Гц ($2500 \text{ мкс} - \text{период}$) $200\,000 = 80\,000\,000 / 400$. Если уменьшить частоту преобразования до $F_1 = 10$ Гц, а частоту МК увеличить до 140 МГц, то можно повысить разрешающую способность АЦП с ФАПЧ до 24 разрядов.

На основании изложенного можно сказать, что разрешающая способность АЦП с ФАПЧ определяется быстродействием (элементной базой) схемы ФД и тактовой частотой МК или счётчика, который формирует сигнал F_1 . Предельные рабочие частоты МК и логических элементов уже достигли уровня 1 ГГц и выше. Важно отметить, что потенциальные возможности АЦП с ФАПЧ большие, а цена его низкая. При этом в устройстве только один прецизионный элемент – это операционный уси-

Таблица 2. Параметры 15-канальной системы сбора информации на базе 32-разрядного микроконтроллера 1986ВЕ1Т и АЦП с ФАПЧ

Наименование параметра	Значение параметра
Число разрядов АЦП	18
Число отсчётов АЦП	200 000
Приведённая погрешность преобразования,	Менее 0,1% в диапазоне температур $-60...+125^\circ\text{C}$
Рабочий диапазон входного сигнала, В	0,5...4,5
Вес младшего разряда выходного кода АЦП, мкВ	25
Уровень «шума» в выходном сигнале АЦП, мкВ	125 (в размахе)
Полоса пропускания АЦП, Гц	80
Рабочая частота преобразователя с ФАПЧ, Гц	400
АЧХ АЦП	Фильтр низкой частоты второго порядка с подавлением помех с частотами кратными 400 Гц
Тип	АЦП с промежуточным преобразованием напряжения в длительность импульсов
Способ преобразования	Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ)
Используемые микросхемы	Микросхема 2-канального ФАПЧ (БМК г. Зеленоград) 5503ХМ1У-653, 8 шт.

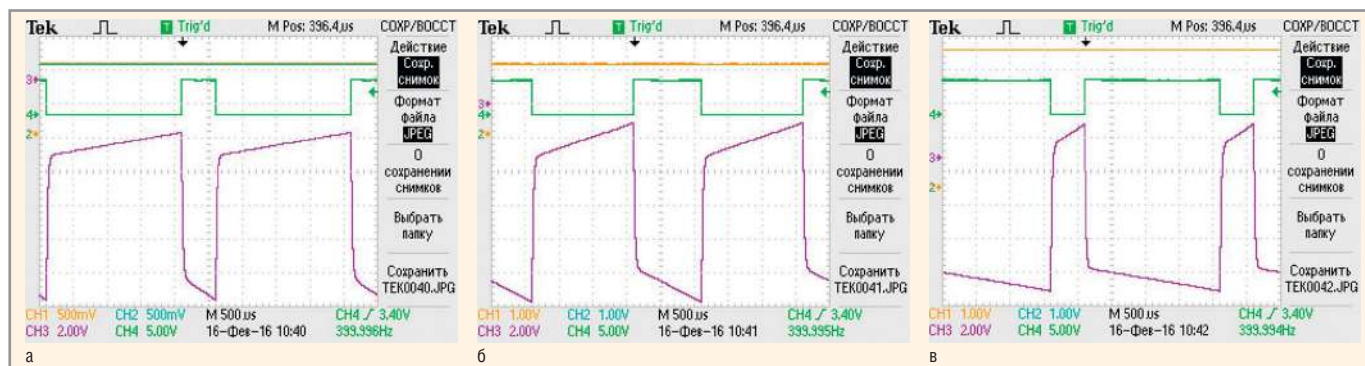


Рис. 7. Осциллограммы для разных уровней входного напряжения: а – $U_x = 1$ В; б – $U_x = 2$ В; в – $U_x = 4$ В

Обозначения: жёлтый луч – напряжение на входе «+» ОУ; голубой луч – напряжение на входе «-» ОУ; малиновый луч – напряжение на выходе ОУ; зелёный луч – напряжение на выходе ФД (за исключением места наложения голубого и жёлтого луча из-за равенства напряжений).

литель. Остальные элементы (резисторы и конденсаторы) могут иметь разбросы $\pm(5-10)\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейчас во многих устройствах используются ШИМ-регуляторы: прецизионная передача аналогового сигнала через оптрон, управление многофазными инверторами на тиристорах, аналоговые шкалы на светодиодах, системы электронного зажигания автомобилей и т.д. Применение микросхемы ФАПЧ

в этих устройствах позволит упростить схемы и повысить точность.

Разработанная микросхема ФАПЧ 5503ХМ1У-653 допускает работу в широком диапазоне температур от -60°C до $+125^\circ\text{C}$. В перспективе планируется выпуск 2- и 3-канальных микросхем ФАПЧ с ОУ и питанием +5 В, с ёмкостью 5 и ОТК.

Для более широкого применения ФАПЧ необходимо наладить выпуск дешёвых микросхем (в пластиковых корпусах), а в учебных программах

вузов уделять больше внимания изучению ФАПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михаил Сизов. Преобразователь напряжения в длительность импульса, стабилизированный ФАПЧ. Современная электроника. 2012. №6.
2. Система ФАПЧ и её применения. www.catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=1478.
3. Контур фазовой автоподстройки частоты и его основные свойства. www.dsplib.ru/content/pll/pll.html.

