

# Современный взгляд на концепцию многоканальных АЦП

В.А. Жмудь  
НГТУ (Новосибирск, Россия)

**Аннотация:** Критически проанализирован широко распространенный, хотя и ошибочный способ построения многоканальных систем сбора и обработки данных (ССОД) на основе одноканальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Результаты убедительно свидетельствуют, что при использовании ошибочного способа приходится жертвовать точностью и (или) быстродействием, поэтому данный способ использования АЦП себя категорически не оправдывает. Предлагается альтернативный способ, который при кажущейся нерациональности на деле оказывается намного более рациональным.

**Ключевые слова:** системы сбора и обработки данных, коммутаторы, АЦП, аналоговые ключи, устройства выборки-хранения

## ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] сообщалось, что применение внешних коммутаторов аналоговых сигналов для построения многоканальных АЦП может существенно снизить точность этих измерений. Однако до сих пор появляются статьи, где рекомендуется такой способ использования одноканальных АЦП для построения многоканальных систем сбора и обработки данных (ССОД). Этот способ даже зачастую рекомендуется разработчиками микросхем АЦП, что можно заметить в соответствующих инструкциях пользователя. Ссылки на такие публикации не требуются, поскольку, во-первых, их достаточно много, во-вторых, они, по-видимому, и впредь будут появляться. Причиной этого автор предполагает, во-первых, недостаточную осведомленность указанных авторов об этой проблеме вследствие их незнакомства с этой публикацией, во-вторых, возможно, в указанной публикации данный вопрос рассмотрен недостаточно подробно,

вследствие чего читатели не осознают важность этой проблемы и важность правильного ее решения.

## 1. ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Использование АЦП в режиме с коммутацией сложилось исторически. Первые АЦП представляли собой сложное и дорогостоящее устройство, использование нескольких АЦП могли позволить себе немногие, а задача одновременного преобразования нескольких сигналов стояла перед многими исследователями. Указанные АЦП характеризовались не слишком высокой точностью и недостаточным быстродействием, хотя и это уже было большим шагом вперед в сравнении с отсутствием таковых. Так в системе КАМАК использовались десятиразрядные АЦП, двенадцатиразрядные АЦП появились намного позже, время преобразования их составляло десятки и даже сотни миллисекунд. Поэтому они едва подходили для преобразования сигналов с частотой следования чуть выше 10 Гц. Первые шаги по цифровой обработке сигналов также осуществлялись на первых ЭВМ, которые отличались малой разрядностью и малым быстродействием, которые с позиции современной вычислительной техники сочли бы неприемлемыми для любой практической задачи.

Поэтому перед разработчиками ССОД тех времен ставились задачи преобразования сигналов, которые изменялись крайне медленно. Устройства для переключения аналоговых сигналов, существующие в те времена, полностью отвечали задаче достаточно «точной» коммутации сигналов. На этом основании ССОД на основе одного АЦП с коммутатором на входе вполне отвечало задаче. Такие ССОД строились по схеме, упрощенный вариант которой показан на Рис. 1.

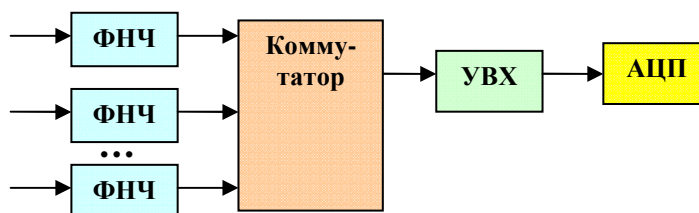


Рис. 1. Схема ССОД на одном АЦП для нескольких каналов (ошибочный способ повышения количества каналов АЦП на современном этапе)

Прежде всего, на выходе источника любого аналогового электрического сигнала должен стоять фильтр нижних частот (ФНЧ). В соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста-Шеннона, верхняя частота спектра преобразуемого сигнала не должна превышать половину частоты преобразования. Например, если частота преобразования составляет  $f_0 = 1 \text{ КГц}$ , и используется десятиразрядный АЦП, то входная частота не должна превышать  $f_1 = 0,5 \text{ КГц}$ , а все спектральные компоненты выше этой частоты должны быть много меньше, чем погрешность этого АЦП, то есть много меньше, чем  $\Delta U = 0,001 \cdot U_{\text{МАХ}}$ . Действительно, погрешность пропорциональна диапазону входных сигналов  $U_{\text{МАХ}}$  и обратно пропорциональна количеству интервалов, на которые этот диапазон разбивается при преобразовании  $n = 2^{-N} = 1 / 1024 \approx 0,009766$ . Для надежности можно потребовать, чтобы остаток не превышал десятой доли от веса младшего разряда, то есть для диапазона входных сигналов  $\pm 1 \text{ В}$  получаем, что ограничение  $|\delta U| \ll \Delta U$  преобразуется в требование  $|\delta U| < 0,1 \text{ мВ}$ . Одна десятая милливольт – это величина, которую можно без особых проблем измерять и наблюдать на осциллографе. То есть погрешность АЦП были намного больше, чем погрешности других устройств для измерения и наблюдения сигналов, то же самое относится и к быстродействию. Разработчик ССОД и не пытался снизить погрешность ниже 0,1%, а подавить высокочастотные шумы до уровня 0,01 % было естественным техническим решением. Это достигалось, по меньшей мере, использованием фильтров.

Коммутатор поочередно подключал выход каждого из фильтров ко входу устройства выборки-хранения (УВХ) [2–4]. УВХ при этом также тактируется в соответствии с режимом подключения внешних сигналов. Если в системе используется  $M$  каналов, то весь цикл работы устройства состоит из  $M$  равных по длительности интервалов, причем за каждый интервал УВХ должно сначала запомнить изменившийся входной сигнал, затем воспроизводить его с заданной точностью на протяжении времени, пока АЦП осуществляет преобразование. Рассмотрим работу УВХ с использованием иллюстрации из работы [2], как показано на Рис. 2. Аналоговый входной сигнал с выхода первого усилителя через ключ поступает на конденсатор, играющий роль аналогового запоминающего устройства.

Авторы описывают работу УВХ следующим образом: «Аналоговый ключ  $S1$  замыкается при поступлении команды SAMPLE (Выборка). Конденсатор  $C$  начинает заряжаться (или разряжаться) до уровня входного сигнала. После определенной временной задержки, называемой «временем захвата», напряжение на конденсаторе достигает границ узкой области вблизи уровня входного сигнала, ширина которого определяется

установленной точностью приближения к этому уровню, и остается внутри данной области. Команда HOLD (Хранение) вызывает размыкание ключа  $S1$ , но на самом деле ключ размыкается после короткого временного интервала, называемого «апертурным временем задержки». Типичное значение апертурного времени  $t_a$  – несколько десятков наносекунд. Величина  $t_a$  определяет *максимальную допустимую скорость изменения входного сигнала*, при которой еще реализуется полная точность преобразования. Однако после размыкания ключа должно пройти некоторое «время установления», прежде чем выходной сигнал УВХ стабилизируется, то есть придет к установившемуся значению и будет готов для преобразования. Однако и после стабилизации уровень этого сигнала на самом деле не остается постоянным, а медленно спадает со временем (утечка заряда). Кроме того, наличие паразитной емкости может привести к появлению на выходе УВХ *выбросов напряжения*, представляющих собой ослабленный отклик схемы на любые большие изменения входного сигнала. Это явление называется *паразитным прохождением сигнала в режиме хранения*. Следует обратить особое внимание на выбор типа и номинала запоминающего конденсатора. При *выборе конденсатора с малой емкостью* уменьшается время захвата, но увеличивается спад напряжения в режиме хранения. С другой стороны, *конденсатор с большой емкостью* более точно хранит напряжение, но при этом может быть неприемлемо велико время захвата. При использовании УВХ в АЦП время хранения, как правило, ненамного превышает время преобразования АЦП. Поэтому для заданного номинала конденсатора мы можем оценить полный спад напряжения за время одного преобразования. Номинал конденсатора выбирается таким образом, чтобы получить наилучшее время захвата при условии, что спад напряжения за время одного преобразования не превышает величины МЗР» (конец цитаты) [2]. В инструкции для пользователей УВХ [3] сказано, что в справочниках, как правило, нормируется время выборки до величины, отличающейся от входной на 0,1 % и на 0,01 %. Простой расчет показывает, что это немного больше погрешности десятиразрядного и тринадцатиразрядного АЦП, соответственно. С учетом требования, чтобы погрешность УВХ была все же меньше, чем собственная погрешность АЦП, а не равная ей, и тем более не больше, использовать можно на самом деле только время достижения погрешности, равной 0,01 % при работе с десятиразрядным АЦП. Если же мы хотим использовать семнадцатиразрядный АЦП, то надо удвоить время достижения погрешности 0,1%, а если ориентируемся на двадцатиразрядный АЦП, необходимо сложить время достижения погрешности 0,1 % и время достижения погрешности 0,01 %. Подход прост: при сложении времен величину относительной

погрешности можно вычислить перемножением.

Действительно, если за время  $t_1$  погрешность снизится в 1000 раз, а за время  $t_2$  погрешность снизится в 10000 раз, то для того, чтобы погрешность снизилась в 10000000 раз необходимо, чтобы прошло, например, сначала время  $t_1$ , а оставшуюся погрешность еще дополнительно надо снизить в 10000 раз, то есть требуется еще время  $t_2$ . Обратное, если время хранения рассчитывалось из требования, чтобы за время хранения погрешность не превысила МЗР для десятиразрядного АЦП, то при использовании двадцатиразрядного АЦП это время следует в расчете принимать меньшим, в данном случае вдвое. Например, если при использовании десятиразрядного АЦП время выборки составляло, например, 2 мс, а время хранения составляло 8 мс (при общей длительности цикла 10 мс), то для использования двадцатиразрядного АЦП следует время выборки увеличить вдвое, доведя его до 4 мс, а время хранения уменьшить вдвое, сократив его до 4 мс.

Предположим теперь, что мы используем дорогостоящий двадцатиразрядный АЦП, характеризующийся временем преобразования

4 мс, и хотим на его основе разработать двухканальную ССОД. Цикл преобразования должен занимать два равных интервала, по одному на каждый канал. Внутри этих интервалов должно присутствовать время выборки и время хранения УВХ и преобразования АЦП. Даже если бы время выборки было пренебрежимо мало в сравнении с временем хранения и преобразования, данный АЦП мог бы выдавать данные по каждому каналу лишь вдвое реже, чем при работе с одним каналом. Поскольку время выборки может вследствие рассмотренных причин приближаться к времени преобразования, получаем, что указанный АЦП будет работать, возможно, в четыре раза медленнее, чем при работе с одним каналом.

Едва ли целесообразно применять более дорогостоящий АЦП, не используя его в полной мере. Действительно, если данный АЦП способен выдавать один отсчет каждые 4 мс, то при данном режиме работы он будет выдавать один отсчет на канал лишь каждые 16 мс, но в этом случае его можно было бы заменить двумя в четыре раза более медленными АЦП.

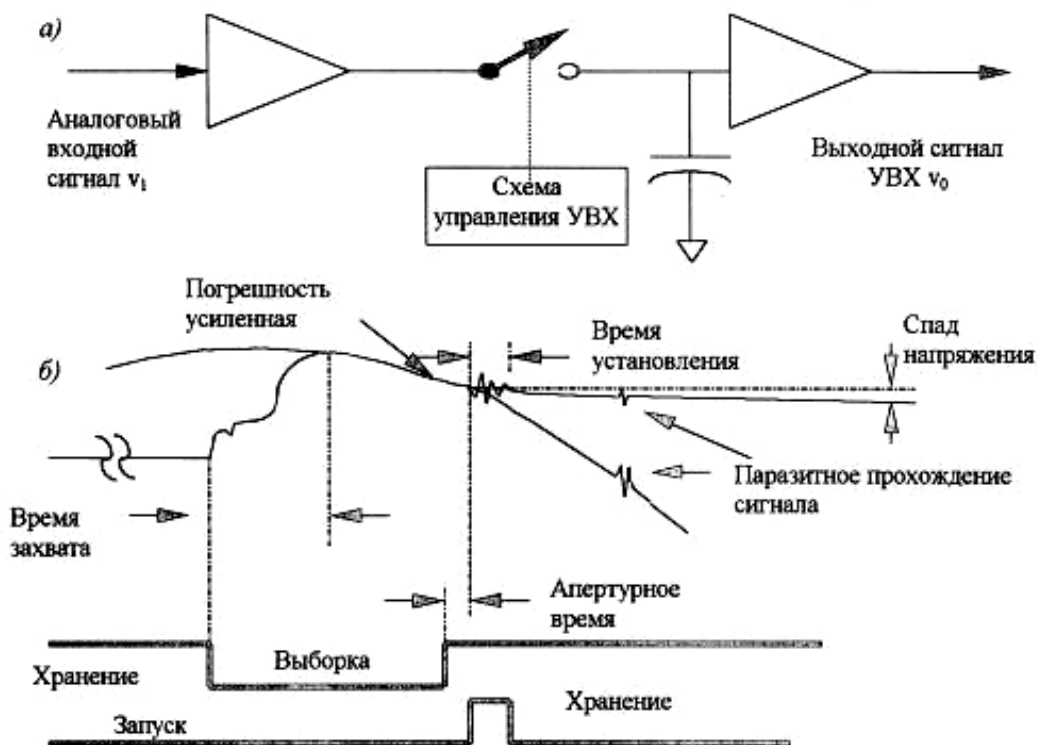


Рис. 2. Пояснения работы УВХ из публикации [2]: а) упрощенная принципиальная схема, б) временная диаграмма сигналов с указанием важнейших характеристик

## 2. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВАРИАНТ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ССОД

В любом случае применение УВХ между коммутатором и АЦП нецелесообразно, поскольку в этом случае (Рис. 1) УВХ после каждого переключения находится в режиме переходного процесса с большими начальными отклонениями, соответствующими различию

сигналов в соседних каналах. Для окончания переходного процесса с требуемой точностью необходимо значительное время.

Способ соединения, показанный на Рис. 3, предпочтителен, если коммутатор обеспечивает относительно быструю передачу сигнала с входа на выход с требуемой точностью.

В этой схеме фильтры на входе каждого канала ограничивают спектр обрабатываемых сигналов, поэтому переходные процессы в УВХ

осуществляются при малых начальных отклонениях и быстро входят в режим.

При потребности в многоканальных АЦП предпочтительно применение такой микросхемы либо отдельного АЦП на каждый канал. С учетом малой стоимости современных АЦП, представляющих собой всего лишь одну микросхему, указанный способ, показанный на

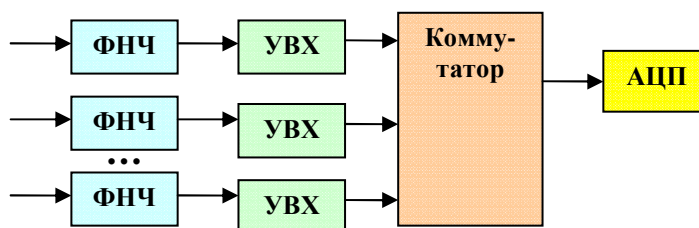


Рис. 3. Допустимый способ повышения количества каналов АЦП

Вследствие рассмотренных обстоятельств следует настоятельно рекомендовать предпочтительный вариант создания многоканальной схемы измерения, показанный на Рис. 4.

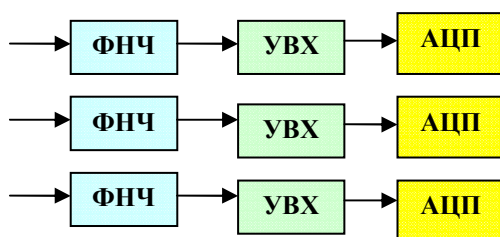


Рис. 4. Рекомендуемый способ создания многоканального АЦП

### 3. ЗАМЕЧАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО СЛЕДЯЩИХ АЦП

Особое место занимают следящие АЦП, в которых отслеживаемый код преобразуется в аналоговый сигнал, например, с помощью ЦАП, полученный сигнал сравнивается с входным сигналом, и контур отрицательной обратной связи изменяет получаемый код за счет действия этой обратной связи. Действительно, если сигнал, формируемый из кода, меньше, чем входной аналоговый сигнал, этот код увеличивается, если меньше, то уменьшается. Как вариант, код может формироваться реверсивным счетчиком.

Следящие АЦП способны обеспечивать наивысшую точность в сравнении со всеми остальными видами АЦП. Если же в процессе слежения такие АЦП периодически переключают свои входы от одного сигнала к другому, высокая точность в принципе не достигается, поскольку значительную долю времени эти АЦП находятся в переходном процессе. Поэтому при использовании следящих АЦП переключение сигналов на их входы категорически не рекомендуется. При необходимости многоканального преобразования допустима только схема по Рис. 4.

Рис. 4, следует считать самым предпочтительным. Это особенно важно для систем высшей точности (для научных целей), поскольку стоимость эксперимента, ценность получаемой информации и требования к достоверности результата высоки, а экономия количества микросхем ценой потери быстродействия и (или) точности неуместна.

Разновидностью следящей АЦП является АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляцией. В таких АЦП сигнал обратной связи является импульсным, равенство его среднего значения входному аналоговому сигналу достигается за счет вносимой обратной связью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Также сигнал ШИМ преобразуется в код, который с высокой точностью соответствует значению входного сигнала. Такие АЦП также являются наиболее точными среди прочих, в настоящее время достигают двадцати разрядов и выше. К ним относятся все вышеприведенные рассуждения, поэтому для таких АЦП также противопоказана коммутация, схемы, показанные на Рис. 1 и 3 категорически не рекомендуются, рекомендуется только схема по Рис. 4.

Некоторые микросхемы АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляцией выпускаются в многоканальном исполнении, причем увеличение количества каналов обеспечивается именно за счет коммутации. На основании приведенных выше аргументов мы не рекомендуем использование этих АЦП в многоканальном режиме. При необходимости достижения наивысшей точности рекомендуется использование только одного канала, остальные каналы следует отключить, а при невозможности их отключения – включить параллельно с первым каналом.

### 4. ИЛЛЮСТРАТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для наглядности покажем результаты моделирования сигналов в системе по Рис. 1 и по Рис. 4.

Схема для моделирования работы двухканального устройства по схеме Рис. 1 для случая, когда сигнальные входы объединены, как мы это рекомендуем, показана на Рис. 5.

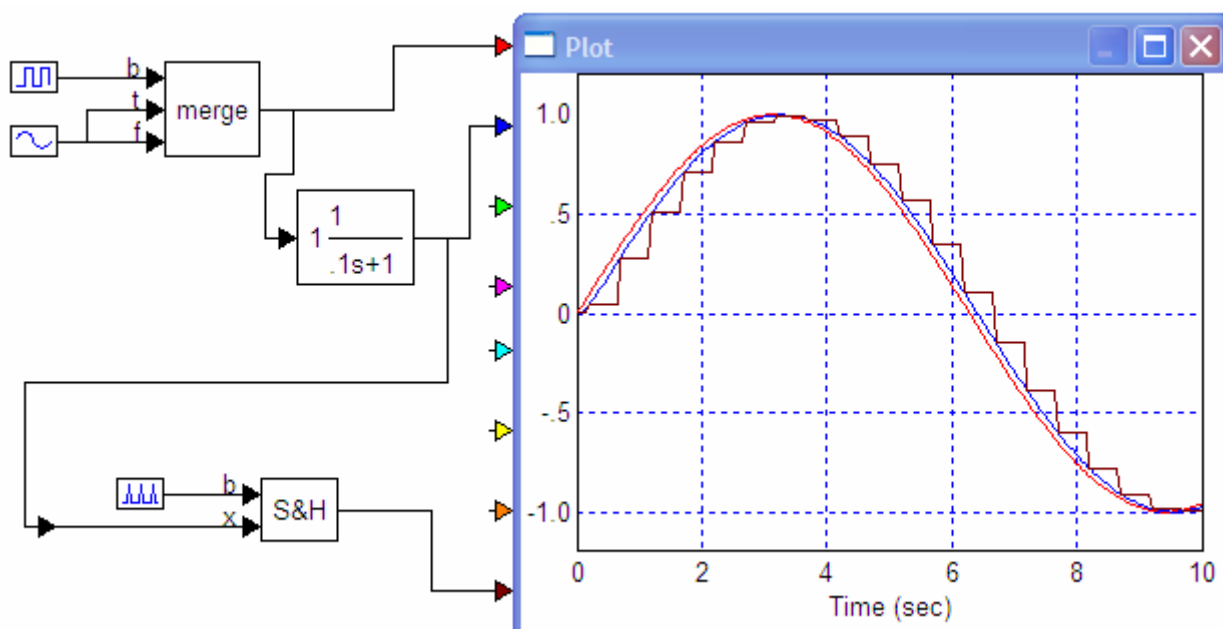
Блок *merge* имитирует коммутатор, который на свой выход по сигналу *b* поочередно подключает один из входов, отмеченный, соответственно, буквами *t* и *f*. Эти два входа

объединены и подключены к выходу генератора гармонического сигнала. Блок S&H имитирует работу идеальной части УВХ, не включающей ее инерционную часть. Инерционная часть УВХ имитируется фильтром первого порядка.

На интервале «выборка» происходит заряд запоминающего конденсатора, поэтому переходный процесс описывается экспоненциальной функцией асимптотического приближения к установившемуся значению. Для примера можем взять фильтр первого порядка с постоянной времени 0,1 условной единицы (например, миллисекунды). Если подавать синусоидальный сигнал с периодом около 15,7 условных единиц, на выходе такого фильтра будет иметь место запаздывание сигнала относительно входного, как показано на *Рис. 5*, где красной линией показан входной сигнал, а синей линией – сигнал на выходе фильтра, имитирующего фильтрующие свойства УВХ. Моменты включения запоминающих свойств

УВХ задаются сигналами с выхода формирователя коротких импульсов. В результате на выходе УВХ формируется ступенчатый сигнал, который аппроксимирует изменяющийся входной синусоидальный сигнал (черная линия). Видим, что если бы ступеньки были достаточно малы, то искажение формы сигнала было бы несущественным. Малая величина ступенек может быть достигнута при одновременном соблюдении двух условий: а) частота преобразований должна быть намного больше, чем частота входного сигнала – это обеспечит малый шаг дискретности по времени; б) разрядность АЦП должна быть достаточно высокой, чтобы шаг дискретности квантования по уровню также был достаточно малым.

На *Рис. 6* показан результат моделирования той же схемы, когда на второй вход не подается сигнал, то есть вход *t* работает как вход, на который подан нулевой сигнал.



*Рис. 5.* Схема моделирования работы двух каналов УВХ при объединении двух входов

В работе устройства явно выражены два цикла. В нечетном цикле на вход УВХ (в случае моделирования – на вход фильтра) поступает входной гармонический сигнал, а в течение четных циклов на этот вход поступает нулевой сигнал. Поэтому на протяжении нечетных циклов выходной сигнал фильтра экспоненциально приближается к фрагменту гармонического сигнала, а на протяжении четных циклов он экспоненциально разряжается к нулю. По окончании цикла заряда УВХ запоминает полученный сигнал. Запоминание происходит лишь по окончании нечетных периодов, поскольку нам нужно проследить лишь работу первого канала, на который поступает синусоидальный сигнал. Мы видим, что синий

сигнал на графике *Рис. 6* теперь имеет вид изрезанной синусоиды, что и ожидалось. Но вершины этого сигнала заканчиваются не там, где должны, а существенно ближе к нулю, поскольку переходный процесс не успевает завершиться. Поэтому результат преобразования на выходе УВХ (черная линия) резко отличается от того вида, который желательно было бы получить. Теперь для того, чтобы этот сигнал был в достаточной мере адекватен входному, дополнительно к указанным двум требованиям необходимо добавить третье, которое состоит в том, что переходный процесс на выходе фильтра должен полностью завершиться. В данном случае «полностью» означает «с точностью до погрешности, которая соответствует МЗР АЦП».

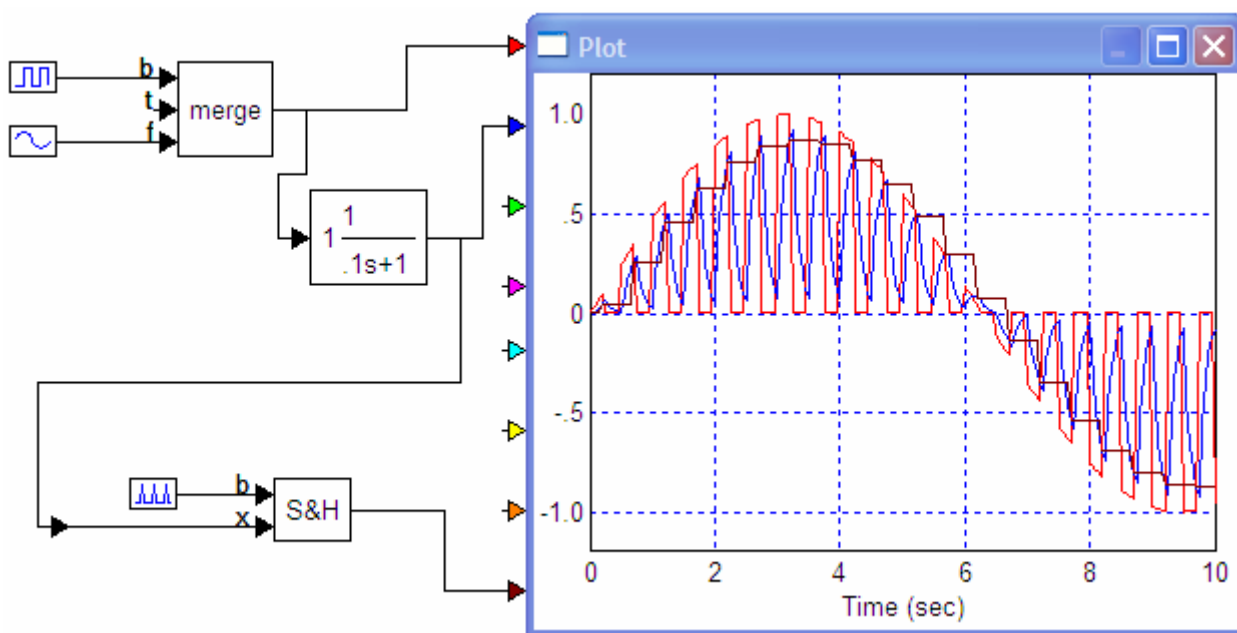


Рис. 6. Схема моделирования работы двух каналов УВХ при подаче сигнала только на один из входов

Для сопоставления двух результатов на Рис. 7 показаны оба графика в одних осях: синяя линия показывает сигнал, если бы оба входа коммутатора были объединены, черная линия показывает результат, когда только на один вход подается синусоидальный сигнал, а на второй вход коммутатора подан нулевой сигнал.

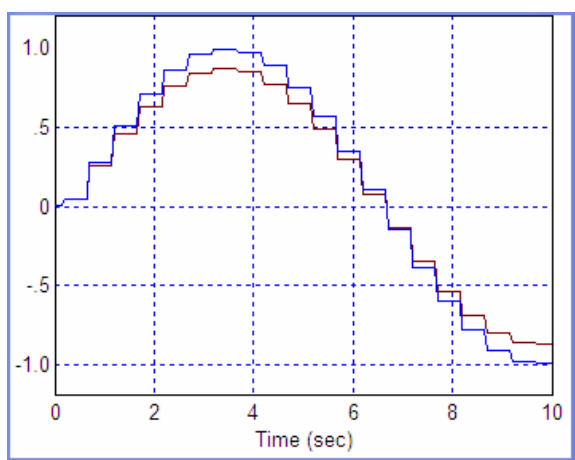


Рис. 7. Результат моделирования работы двух каналов УВХ: синяя линия – при объединении двух входов, красная линия – при подаче сигнала только на один из входов

Эти два варианта сигнала представляют собой результат преобразования сигнала с помощью ССОД, которая сделана на одном АЦП и одном коммутаторе на два канала. Можно сказать, что часть сигнала со второго канала проходит на первый канал в виде добавки. Аналогично часть сигнала с первого канала пройдет на выход второго канала, что мы не можем

продемонстрировать, поскольку эта часть работы АЦП не моделировалась, но в силу симметрии свойств этого устройства это утверждение не требует доказательств. Также это можно продемонстрировать, если на второй вход коммутатора подать сначала сигнал, равный плюс единице, а затем – сигнал, равный минус единице. Результаты моделирования показаны на Рис. 8. На Рис. 9 показан результат моделирования такой системы, когда на второй вход подается также гармонический сигнал, но другой частоты. Разные цвета графиков соответствуют разному знаку амплитуды сигнала на втором входе, то есть сдвигу на пол периода. Видно, что в системе возникают биения разностной частоты вследствие проникновения на первый выход части сигнала со второго входа. Эти биения легче разглядеть в дифференциальном сигнале, то есть в таком, в котором синий график соответствует положительной амплитуде, а красный график – отрицательной амплитуде, поэтому в пиках разница между критическими точками удвоена по сравнению с тем, какой бы она была, если бы на второй вход поступал нулевой сигнал.

Наконец, на Рис. 10 показан результат моделирования преобразования постоянного сигнала в том случае, когда на второй вход поступает гармонический сигнал. Отметим, что при трех различных фазах этого сигнала мы видим соответствующую добавку в результате преобразования. Среднее всех этих сигналов более чем на 10 % меньше того значения, которое должно быть получено в результате преобразования простым АЦП без коммутации.

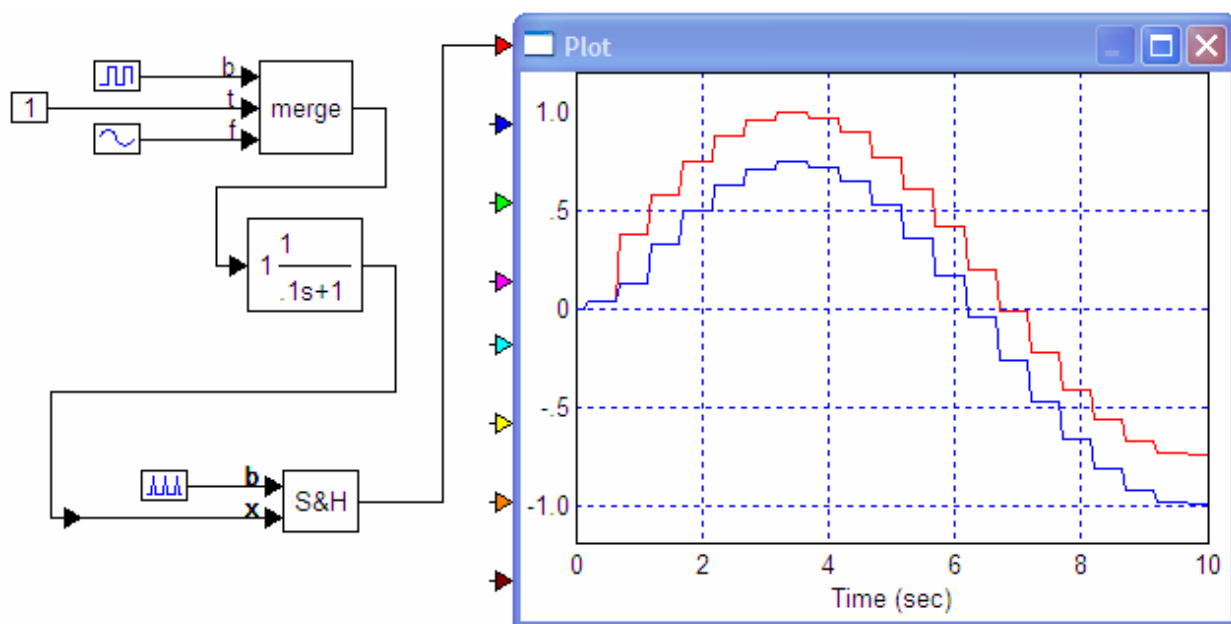


Рис. 8. Результат моделирования работы двух каналов УВХ: синяя линия – при подаче на второй вход сигнала «минус единица», красная линия – при подаче на второй вход сигнала «плюс единица»

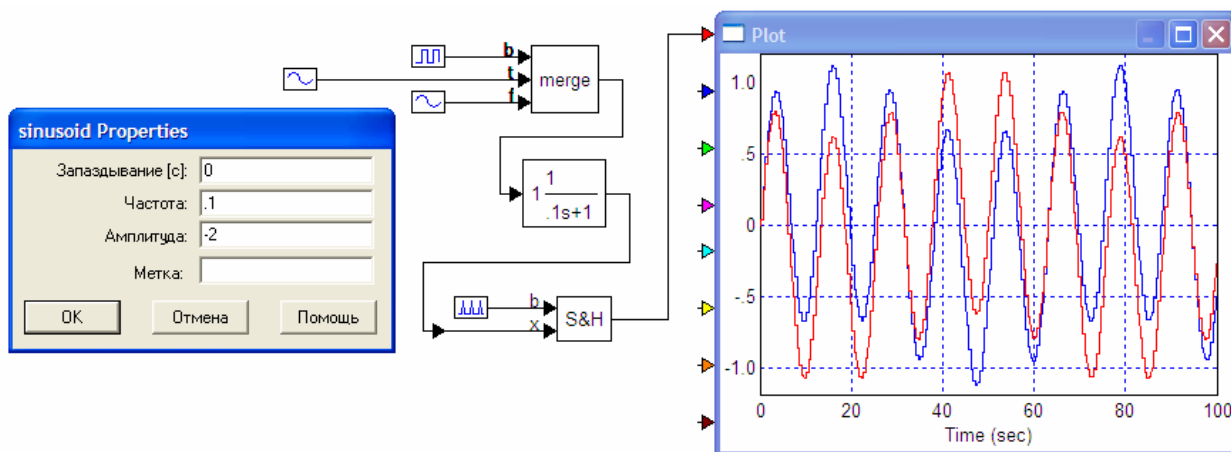


Рис. 9. Результат моделирования работы двух каналов УВХ: синяя линия – при подаче на второй вход гармонического сигнала с положительной амплитудой, красная линия – то же с отрицательной амплитудой

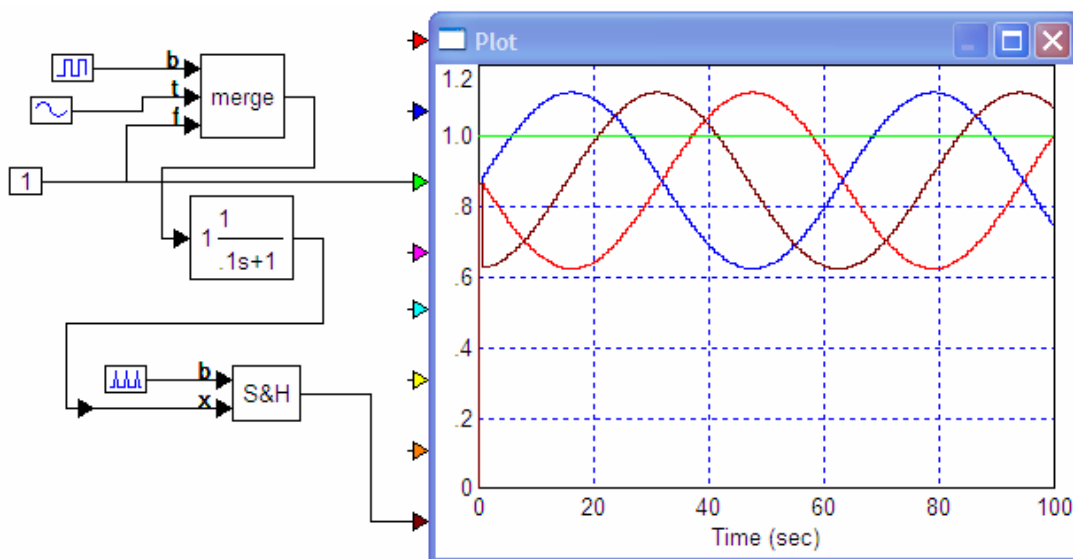


Рис. 10. Результат моделирования работы двух каналов УВХ: требуемый уровень равен единице, синяя, красная и черная линии – при подаче на второй вход гармонического сигнала с различной фазой

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическими рассуждениями и моделированием показано, что применение одного АЦП для преобразования сигналов более чем от одного источника нецелесообразно. Целесообразно соблюдать принцип: «один сигнал – один АЦП». Альтернативный подход с коммутацией мог быть оправдан лишь на заре электронной техники, когда АЦП были чрезвычайно дороги, и при этом все же перед ССОД ставились такие примитивные задачи, что быстродействия АЦП хватало с большим запасом, как и точности.

Если же быстродействие и точность ССОД должно соответствовать применяемой элементной базе по АЦП, то в ССОД должно содержаться столько АЦП, сколько имеется каналов преобразования аналогового сигнала в цифровой, при этом коммутатор сигналов становится не нужным.

При внимательном рассмотрении ситуации оказывается, что и УВХ также не нужно. Действительно, если не выполнено условие теоремы Котельникова-Найквиста-Шеннона, то преобразование происходит некорректно (кроме специальных случаев преобразования узкополосного сигнала с получением разностной частоты).

Если же условия этой теоремы выполнены, то это означает, что входной сигнал не должен изменяться более чем на небольшую долю младшего разряда во время преобразования. Остаточное небольшое изменение является губительным для процесса преобразования только в случае использования АЦП поразрядного уравнивания. Все остальные виды АЦП могут работать в таких условиях без проблем. Указанный же АЦП поразрядного уравнивания применяется чрезвычайно редко в последнее время, поскольку уступает по основным характеристикам другим типам АЦП, в частности, АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляцией.

Естественно, схема построения ССОД должна учитывать не только быстродействие и точность применяемых АЦП, но и их тип, то есть способ получения отсчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Жмудь Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.

- [2] Информационно-измерительные системы. Часть 1. Автор: Крюков В.В., редактор: Ильин А.А. [Электронный ресурс] URL: [http://abc.vvsu.ru/Books/I\\_i\\_s\\_1/page0013.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/I_i_s_1/page0013.asp)
- [3] Sample-and-Hold Amplifiers. MT-090 Tutorial. Analog Devices. [Электронный ресурс] <http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/MT-090.pdf>
- [4] Устройство выборки и хранения. [Электронный ресурс] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Устройство\\_выборки\\_и\\_хранения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Устройство_выборки_и_хранения)



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
E-mail: [oa0\\_nips@bk.ru](mailto:oa0_nips@bk.ru)

## Modern View to the Concept of Multi-Channel ADC

VADIM ZHMUD

*Abstract:* The paper critically analyzes widespread, though erroneous method of constructing a multi-channel data acquisition system (DAS) based on the single-channel analog-to-digital converters (ADC). The results strongly suggest that if you use an incorrect method to sacrifice accuracy and (or) speed, so this way of using of ADC itself is strongly not justified. It offers an alternative method that despite the seeming irrationality of in fact is much more rational.

*Key words:* data acquisition system, switches, ADC, analog switches, sample-and-hold device

## REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud Simulation study and optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.
- [2] V.V. Kriukov. Information-measurement systems. Part 1. Editor: A.A. Il'in. [Electronic resource] URL: [http://abc.vvsu.ru/Books/I\\_i\\_s\\_1/page0013.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/I_i_s_1/page0013.asp)
- [3] Sample-and-Hold Amplifiers. MT-090 Tutorial. Analog Devices. [Electronic resource] <http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/MT-090.pdf>
- [4] Sample and Hold devices. [Electronic resource] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Устройство\\_выборки\\_и\\_хранения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Устройство_выборки_и_хранения)