

пивших на ее вход за время измерения, и в дальнейшем остается неизменным. В режиме индикации на управляющий вход  $K_2$  с выхода триггера поступает разрешающий потенциал, и тактовые импульсы с выхода ГИ проходят на шину тактирования, благодаря чему с выхода каждой декады поступает информация о ее состоянии, представленная в фазоимпульсном десятичном коде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Л. Маркман. Новые приборы и технико-экономическая эффективность их применения.— Новые приборы и комплектные устройства для точных электрических и магнитных измерений. Киев, УкрНИИТИ, 1970.
2. Г. Т. Евсеев, А. А. Марчук. Цифровой счетчик импульсов с предустановкой.— Механизация и автоматизация управления, 1971, № 1.
3. В. И. Корнейчук, К. Г. Самофалов. Многоустойчивые элементы в вычислительной технике.— Механизация и автоматизация управления, 1969, № 1.
4. Д. А. Абдуллаев, А. М. Смоляк. Структурная надежность цифровых устройств на многоустойчивых элементах.— Автоматика и телемеханика, 1971, № 3.
5. Л. С. Ситников, Л. Л. Утяков. Счетчиковые структуры с фазоимпульсным кодированием на основе интегральных схем.— Автометрия, 1970, № 4.
6. К. Г. Борисов, Л. С. Ситников, Л. Л. Утяков. Новые возможности построения универсальных счетных декад на интегральных схемах.— Приборы и системы управления, 1972, № 4.

*Поступила в редакцию 12 июля 1972 г.*

УДК 621.317.70

**А. Н. КАСПЕРОВИЧ, Н. В. ЛИТВИНОВ**

*(Новосибирск)*

### **О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫБОРКИ И ХРАНЕНИЯ**

Одним из эффективных средств повышения быстродействия аналого-цифровых преобразователей (АЦП) — в смысле повышения допустимой скорости изменения измеряемой величины — является использование в АЦП фиксаторов уровня, иначе говоря, устройств выборки и хранения (УВХ). В [1] были рассмотрены основные составляющие погрешности УВХ.

Как показано в [1], УВХ характеризуются динамическими погрешностями: а) погрешностью, определяемой затуханием переходных процессов после каждой новой выборки; б) погрешностью, возникающей в режиме слежения; подробно эта составляющая УВХ была рассмотрена в [2]; в) апертурной погрешностью, определяемой конечным временем выключения ключа УВХ — и статическими погрешностями узлов УВХ, из которых целесообразно выделить погрешность «скачка», возникающую в момент изменения состояния ключевого элемента УВХ.

В [3] описана и тщательно проанализирована реализация одноктактного УВХ с обратной связью, позволяющего в ряде случаев получать хорошие результаты. Для уменьшения общего времени измерения и для уменьшения погрешности, вызываемой переходными процессами, были предложены двухтактные УВХ. Одно из таких УВХ было рассмотрено в [4].

С целью определения целесообразности их дальнейшего использования было теоретически и экспериментально исследовано двухтактное УВХ с временем хранения около 500 нс. Ниже рассматриваются погрешности двухтактных УВХ, описывается реализация такого УВХ, определяются целесообразные области применения двухтактных УВХ.

Блок-схема двухтактного УВХ, выполненного по разомкнутой схеме, приведена на рис. 1. В этом устройстве подобно описанному в [5] в качестве ключевых элементов были использованы полевые транзисторы.

Было бы заманчивым исключить из схемы буферные каскады БК<sub>2</sub>, БК<sub>2</sub><sup>\*</sup>, что позволило бы существенно упростить схему. Из теоретических соображений ясно, что здесь может стать заметной погрешность, возникающая за счет того, что в момент переключения ключи обоих каналов будут частично открыты и это будет вызывать перераспределение напряжений на емкостях. Окончательно оценку подобной схемы можно провести только после выполнения соответствующих экспериментальных исследований.

Кратко рассмотрим элементы блок-схемы рис. 1. Входной буферный усилитель БК<sub>1</sub> выполнен по оригинальной схеме, изображенной на рис. 2. По сути дела это модернизированная схема эмиттерного повторителя на транзисторах разного типа проводимости, который был использован в [5]. Одной из главных причин возникновения погрешности в коэффициенте передачи обычного эмиттерного повторителя в большом диапазоне изменения входного сигнала является зависимость параметров транзистора от его режима (главным образом от напряжения на коллекторе и тока эмиттера). Для уменьшения этой погрешности питание основных транзисторов осуществляется от «плавающих» источников питания, напряжение которых следует за входным.

Такая схема может обеспечить погрешность передачи 0,1% в диапазоне  $\pm 5$  В, хорошо работает на емкостную нагрузку, имея при этом одинаковые фронты выходного напряжения при положительных и отрицательных перепадах входного напряжения. Постоянная времени БК<sub>1</sub> порядка 12—18 нс.

Буферные усилители БК<sub>2</sub> и БК<sub>3</sub> выполнены по обычной схеме с обратной связью, изображенной на рис. 3. Одной из причин выбора этой схемы явилось стремление получить у выходного каскада УВХ малое

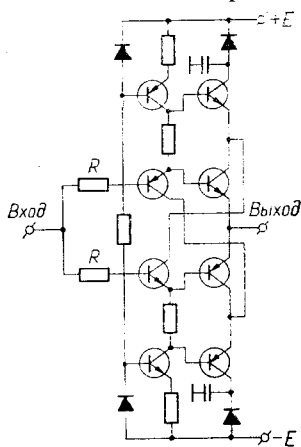


Рис. 2.

выходное сопротивление с целью простого преобразования выходного напряжения УВХ в ток с помощью резистора. Чтобы не вызывать накопления заряда на  $C_n$ , входные токи БК<sub>2</sub> и БК<sub>2</sub><sup>\*</sup> должны быть минимальными. При времени хранения 500 нс и  $C_n = 750$  пФ входные токи не должны превышать 50—70 мкА. Статическая погрешность усилителя с учетом погрешности от входного тока в диапазоне  $\pm 5$  В составляет 0,15—0,2%. Постоянная времени каскада порядка 50—60 нс.

Недостатком такой схемы БК является то, что из-за саморазогрева транзисторов приходится ток коллектора транзисторов выбирать меньшим, чем это хотелось бы из соображений динамики. Поэтому в выборе тока должен быть разумный компромисс (ток порядка 1 мА).

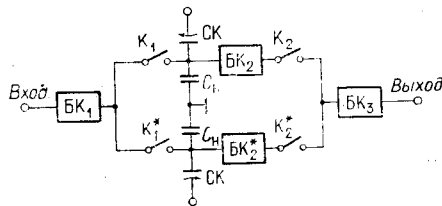


Рис. 1.

Использование полевых транзисторов в качестве ключевых элементов влечет за собой применение высоковольтных (относительно уровней микросхем) схем управления (ВС). В разработанном устройстве была использована схема с плавающим потенциалом запирания ключа [6]. Эта схема (рис. 4) обеспечивает размах управляющего напряжения 20 В с фронтом около 20 нс. Транзисторы  $T_1, T_2$  образуют эмиттерный повторитель (ЭП), который с достаточной точностью отслеживает изменение входного напряжения. С ЭП подается сигнал, смещенный на 9 В,

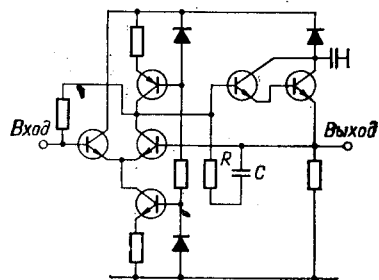


Рис. 3.

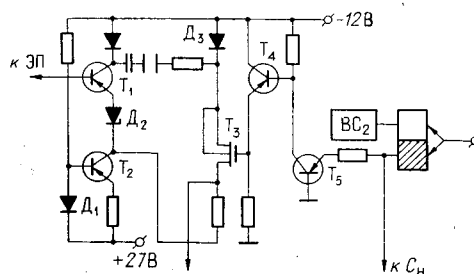


Рис. 4.

на стоковое сопротивление  $T_3$ . Этим самым создается плавающий потенциал запирания ключей.

В качестве ключей были использованы полевые транзисторы ТН-12МД. При их применении следует учитывать, что ток подложки этих транзисторов не нормируется и поэтому может быть весьма значительным. Поскольку этот ток может поступать на накапливающий конденсатор и менять за счет падения на выходном сопротивлении буферных каскадов их выходные сигналы, полевые транзисторы приходится отбирать по этому параметру.

Очевидно, что статические погрешности подобного двухтактного УВХ будут больше, чем однотактного. Добавочный вклад внесут ключи  $K_2^*$ ,  $K_2$  (ключи являются источниками погрешности, поскольку токи на подложку текут через выходные сопротивления предыдущего каскада) и буферный каскад БК<sub>3</sub>. Кроме того, при использовании двухтактного фиксатора из-за разницы в параметрах каналов результаты измерений на четных и нечетных тактах будут различаться. Однако следует заметить, что дополнительной погрешности разницы в каналах не создает; если погрешность каждого канала лежит в допустимых пределах, то и погрешность УВХ будет находиться в этих пределах.

Погрешность скачка в этой схеме обусловлена «пролезанием» управляющего сигнала в момент отключения входного сигнала от накопительного конденсатора  $C_n$ . Значение погрешности скачка  $\Delta_{ск}$  зависит от значения сигнала, пропорционально амплитуде управляющего сигнала и емкости затвор—сток и обратно пропорционально емкости накопительного конденсатора.

Погрешность  $\Delta_{ск}$ , вызываемая «пролезанием» на выход УВХ управляющего сигнала, может быть стабилизирована, а следовательно, и уменьшена при последующей компенсации путем привязки управляющего напряжения к входному сигналу [6]; тем самым в момент отключения обеспечивается постоянство разности потенциалов между затвором и стоком при произвольном значении входного сигнала. В свою очередь, этим достигается постоянство емкостей затвор—сток и тем самым независимость скачка от входного сигнала.

При компенсации скачка в двухтактном УВХ приходится считаться с тем, что будет иметь место добавочная погрешность из-за неодинаковости емкостей ключей и накапливающих конденсаторов.

В УВХ с ключевым элементом на полевом транзисторе может стать заметной погрешность, вызываемая «пролезанием» входного сигнала через паразитную емкость ключевого элемента, находящегося в состоянии «Разомкнуто». Значение этой погрешности пропорционально приращению входного сигнала, емкости сток — исток ключа и обратно пропорционально емкости накопительного конденсатора.

Как указывалось выше, погрешность из-за заряда накапливающего конденсатора входным током буферного каскада также обратно пропорциональна емкости накапливающего конденсатора.

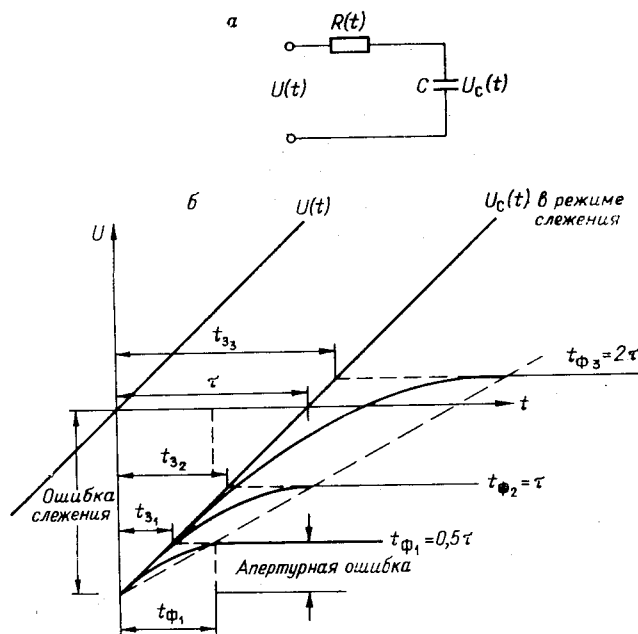


Рис. 5.

Таким образом, для уменьшения статической погрешности УВХ полезно по возможности увеличивать емкость накапливающего конденсатора. Применение двухтактного УВХ позволяет увеличивать емкость этого конденсатора за счет увеличения времени выборки и тем самым уменьшать его статические погрешности. Однако не следует забывать, что при этом возрастает составляющая погрешности в режиме слежения [2].

Теперь остановимся более подробно на апертурной погрешности УВХ на полевых транзисторах. Как известно, под апертурной погрешностью понимается погрешность, вызываемая неопределенностью в датировке отсчета. Наиболее существенные причины апертурной погрешности: а) конечность фронта управляющего ключом напряжения; б) зависимость значения напряжения, необходимого для перевода ключа в состояние «Разомкнуто», от входного напряжения УВХ; в) плавание моментов подачи команд на выборку, вызываемое нестабильностью задержек цифровой части УВХ и всей измерительной системы; г) конечность времени переключения полевого транзистора.

Влияние времени переключения ключа на полевом транзисторе на выходное напряжение УВХ удобно проанализировать, пользуясь эквивалентной схемой запоминающей ячейки, представленной на рис. 5, а.

Уравнение, описывающее УВХ, можно представить следующим образом:

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{U_C}{CR(t)} = \frac{U(t)}{CR(t)}.$$

Для ключа на полевом транзисторе обычно принимается, что

$$R = R_0 \frac{1}{1 - \frac{U_3}{U_0}},$$

где  $U_3$  — напряжение на затворе;  $U_0$  — напряжение отсечки;  $R_0$  — сопротивление ключа в состоянии «Замкнуто».

Предположим, что управляющее ключом напряжение изменяется линейно

$$U_3 = U_{\max} \frac{t}{t_\Phi},$$

где  $t_\Phi$  — длительность фронта управляющего напряжения.

Для простоты будем считать, что входное напряжение изменяется по линейному закону  $U_x = kt$  и изменение управляющего ключом напряжения начинается в момент, когда входной сигнал принимает значение 0. Тогда основное уравнение будет выглядеть так:

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{t}{t_\Phi}\right) = \frac{k}{\tau} t \left(1 - \frac{t}{t_\Phi}\right),$$

где  $\tau = R_0 C$ . Начальное условие  $U_C(0) = -k\tau$ . Не приводя промежуточных выкладок, запишем сразу решение

$$U_C(t) = k \left\{ t - \sqrt{2\tau t_\Phi} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[ \Phi \left( \sqrt{\frac{t_\Phi}{2\tau}} \right) - \Phi(U) \right] e^{U^2} - \tau e^{\frac{t}{2\tau} \left( \frac{t}{t_\Phi} - 2 \right)} \right\},$$

где  $\Phi(x)$  — функция Лапласа;

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt; \quad U = \sqrt{\frac{t_\Phi}{2\tau}} \left(1 - \frac{t}{t_\Phi}\right).$$

Для установившегося режима  $t = t_\Phi$  и

$$U_C(t_\Phi) = k \left\{ t_\Phi - \sqrt{2\tau t_\Phi} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[ \Phi \sqrt{\frac{t_\Phi}{2\tau}} \right] - \tau e^{-\frac{t_\Phi}{2\tau}} \right\}.$$

Из полученного выражения следует, что при принятых выше условиях апертурная ошибка, вызываемая конечной длительностью фронта управляющего напряжения, обратна по знаку ошибке слежения. С другой стороны, проведенный анализ позволяет считать, что процесс выборки осуществляется мгновенно, но с некоторой задержкой  $t_3$ , значение которой можно определить из выражения

$$t_3 = t_\Phi - \sqrt{2\tau t_\Phi} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Phi \left( \sqrt{\frac{t_\Phi}{2\tau}} \right) - \tau e^{-\frac{t_\Phi}{2\tau}}.$$

На рис. 5, б даны графики напряжения  $U_C$  на накапливающем конденсаторе при различных соотношениях между  $\tau$  и  $t_\Phi$ , рассчитанные по приведенным выражениям. На этом же рисунке представлены эквивалентные задержки  $t_3$ , определенные при тех же условиях.

Из сказанного выше следует, что составляющая апертурной погрешности в принципе может быть исключена соответствующей датировкой отсчета и практически будет определяться лишь разбросом параметров элементов.

В ключах на полевых транзисторах значение управляющего напряжения, при котором ключ переходит в состояние «Разомкнуто», зави-

сит как от управляющего, так и от входного напряжения, поскольку необходимо обеспечить определенную разность потенциалов между электродами ключа. Наличие этого явления в силу конечности фронта управляющего напряжения приводит к зависимости момента привязки отсчета от измеряемой величины, что вынуждает либо учитывать этот сдвиг, либо трактовать его как апертурную погрешность.

Предложенное в [6] слежение управляющего напряжения за входным позволяет не только стабилизировать скачок за счет «пролезания», как это указывалось выше, но существенно минимизировать рассматриваемую составляющую апертурной погрешности.

Обсудим теперь некоторые динамические особенности двухтактных УВХ. Переключение в ключах  $K_2$  занимает определенное время, так что аналого-цифровое преобразование нельзя начинать раньше, чем закончатся переходные процессы в ключах  $K_2$  и буферном каскаде БК<sub>3</sub>. В силу этого использование времени хранения в двухтактных УВХ хуже, т. е. АЦП, работающий с двухтактным УВХ, должен иметь меньшее время преобразования, чем соответствующий одноктактный УВХ. В экспериментально исследованном УВХ это время было равно 120 нс.

Заметим, что требования к динамическим свойствам буферных каскадов БК<sub>2</sub>, БК<sub>2</sub><sup>\*</sup> слабее, чем для БК<sub>1</sub>; фазовых погрешностей эти каскады не вносят. Необходимо только, чтобы время установления в них было соизмеримым с временем установления переходных процессов в ключах  $K_2$ ,  $K_2^*$ .

Динамические свойства УВХ проверялись путем наблюдения на осциллографе разностного сигнала между входом и выходом УВХ при синусоидальном входном сигнале с частотой  $\omega$  и амплитудой  $A_{вх}$ . Если УВХ поставлен в режим слежения, т. е.  $C_H$  постоянно подключен к входному напряжению, то выходной сигнал любого из двух каналов представляет собой синусоиду той же частоты и амплитуды, что и входной, но сдвинутую относительно последнего на величину постоянной времени УВХ  $\tau$  (рис. 6, а).

Разностный сигнал в этом случае (см. рис. 6, б) — также синусоида, но с амплитудой  $A_p = 2A_{вх} \sin \frac{\omega\tau}{2}$ . Это выражение позволяет экспериментально определить  $\tau$  и максимальную частоту, при которой погрешность слежения не превышает заданной.

В нормальном рабочем режиме на выходе УВХ присутствует запомненный сигнал либо первого канала, либо второго. Поэтому разностный сигнал имеет «гребенчатую» форму (см. рис. 6, в), основания гребешков лежат на синусоиде с той же частотой  $\omega$  и амплитудой  $A_p$ , как на рис. 6, б. Однако в последнем случае определение динамических характеристик несколько труднее, так как основания гребешков размыты коммутационными выбросами. Поэтому разностная амплитуда определяется с меньшей точностью.

Проверка прохождения входного сигнала через паразитные емкости закрытых ключей производится с помощью осциллографа после записывания ключей  $K_1$  и  $K_2$  и оценивается по тому, какая часть синусоиды пройдет на выход.

Измерения, проведенные на макете, хорошо согласуются с изложенными выше утверждениями.

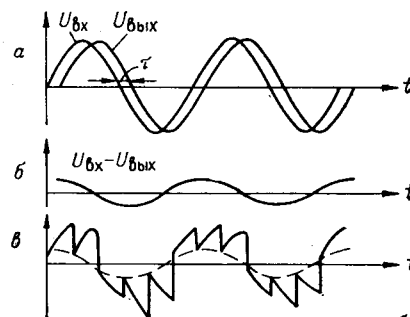


Рис. 6.

## ВЫВОД

Использование двухтактного УВХ позволяет избежать затрат времени на выборку, но требует затрат времени на затухание переходных процессов в ключах каналов. Применение двухтактных УВХ дает возможность увеличить емкость накапливающего конденсатора и тем самым уменьшить статические погрешности УВХ, однако при этом увеличивается динамическая составляющая погрешности в режиме слежения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Алексеев, А. Н. Касперович, Н. В. Литвинов. Динамическая погрешность аналого-цифровых преобразователей с устройством фиксации уровня измеряемого напряжения.— *Автометрия*, 1966, № 5.
2. А. Н. Касперович, Н. В. Литвинов. К вопросу о погрешности устройств выборки и запоминания.— *Автометрия*, 1971, № 5.
3. В. Н. Вьюхин. Компараторный фиксатор уровня напряжения.— *Автометрия*, 1968, № 6.
4. В. А. Алексеев. Об измерительной цепи быстродействующего АЦП.— В сб. «Методы и средства аналого-цифрового преобразования», вып. 1. Новосибирск, «Наука», 1969.
5. Г. А. Ведерникова, А. Н. Касперович. Устройство выборки и хранения ординат высокочастотного сигнала.— *Автометрия*, 1971, № 3.
6. В. Н. Вьюхин. Наносекундный фиксатор уровня.— *Приборы и техника эксперимента*, 1972, № 3.

*Поступила в редакцию 19 октября 1972 г.*

УДК 621.142.681

**В. А. БЕЛОМЕСТНЫХ, А. Н. КАСПЕРОВИЧ**  
(Новосибирск)

## АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОВЫШЕННОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

В последнее время для автоматизации различных научных экспериментов широкое применение находят измерительные системы сбора и обработки информации, содержащие мини-ЭВМ. В этих системах сбор данных должен происходить в темпе исследуемого процесса, в связи с чем аналого-цифровые преобразователи (АЦП) нередко должны обладать повышенным быстродействием (при сохранении обычных требований к точности). Также становится необходимым введение быстродействующих буферных запоминающих устройств для согласования темпа получения цифровой информации и быстродействия запоминающих устройств, используемых в ЭВМ.

АЦП поразрядного уравнивания, построенные при использовании современной элементной базы, позволяют получать быстродействие  $10^6$  измерений в секунду [1, 2]. Чтобы получить большее быстродействие, приходится использовать АЦП поразрядного совпадения или, иначе говоря, параллельно-последовательного кодирования, однако известные реализации таких приборов обеспечивают точность, соответствующую 7—8 разрядам [3, 4].