

В. Е. ЯМНЫЙ

## ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Метрологическая аттестация интегральных микросхем связана с оценкой их статических и динамических параметров, причем наиболее сложными являются динамические измерения. Для быстродействующих компараторов требуется измерять их временные параметры в интервале долей и единиц наносекунд, а погрешность измерения должна составлять единицы пикосекунд. Необходимо измерять время установления усилителей, устройств выборки и хранения в диапазоне до единиц наносекунд при погрешности установления 0,1 % и даже 0,01 %, при этом полосу частот может достигать нескольких сотен МГц.

Методы прямого измерения динамических характеристик не позволяют решить эти задачи, т. к. динамические свойства соответствующих измерительных АЦП того же порядка, что и исследуемых микросхем. В связи с тем, что время измерения параметров микросхем может существенно превышать диапазон временных измерений, можно воспользоваться методами трансформации времени и методами накопления для обеспечения требуемой погрешности измерения.

Важнейшая проблема динамических измерений — создание источников имитационных сигналов, которые по точностным характеристикам должны превосходить хотя бы в 2–3 раза требуемую погрешность измерения. Так, для оценки времени задержки и времени установления необходим генератор импульсов с временем установления не более 10 нс при погрешности установления 0,01 %, а джиттер не должен превосходить 3,5 пс. Для уменьшения шумовых составляющих временного положения сигналов в качестве задающего генератора следует использовать кварцевый генератор, который при соответствующем выборе режимов [1] может обеспечить малый уровень низкочастотных шумов.

В качестве формирователей импульсных сигналов используют наиболее быстродействующие компараторы: 597СА4, AD96685 и логические схемы серии 1500. Экспериментальная оценка потенциальных возможностей таких устройств показала, что уровень временных флуктуаций можно снизить до 1–2 пс.

Важнейшим фактором, определяющим качество сформированных аналоговых сигналов, является правильное конструктивное выполнение схем. В диапазоне нескольких сотен МГц обеспечить погрешность в 0,01 % возможно только при изготовлении всех основных элементов с помощью методов поверхностного монтажа. На рис. 1 приведена принципиальная схема генератора имитационных сигналов, которая обеспечивает время установления импульсов 10 нс при погрешности уста-

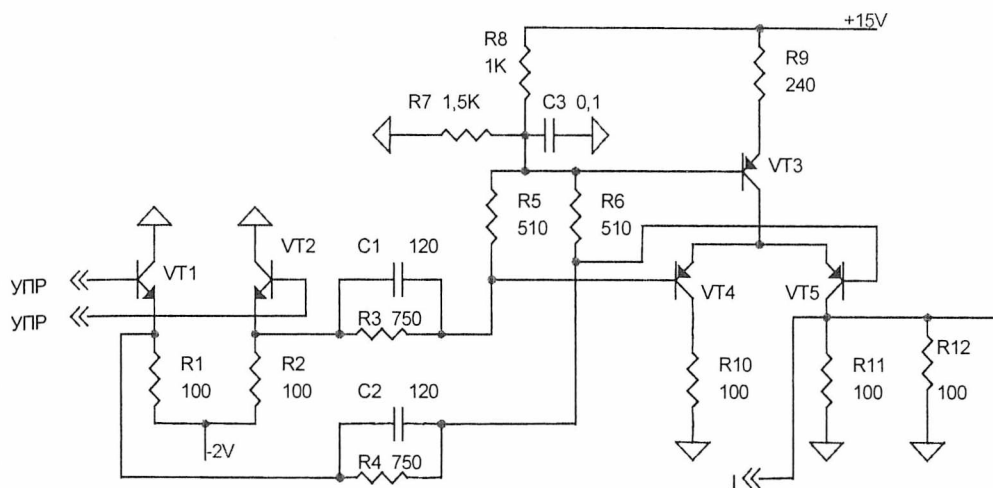


Рис. 1. Принципиальная схема генератора имитационных сигналов

новления не хуже 0,01 % и максимальном выходном сигнале до  $\pm 2$  В при работе на кабель с волновым сопротивлением 100 Ом.

Вторым устройством, определяющим метрологические характеристики измерительных схем, является устройство регулируемой задержки в диапазоне временных измерений — несколько десятков наносекунд при шумовых характеристиках на уровне нескольких пикосекунд. Особенностью построения схемы является предварительное формирование запускающих импульсов с применением туннельных диодов. Структурная схема генератора задержки широко известна [4, 5], однако конструктивное выполнение методом поверхностного монтажа и оптимизации режимов работы транзисторов позволило обеспечить регулируемую задержку в диапазоне 10 нс с разрешением 2 пс [6]. Управление временем задержки осуществлялось с помощью 12-разрядного ЦАП 594ПА1, имеющего дифференциальную нелинейность не хуже 0,1 кванта.

**Измерение времени задержки компараторов.** Измерение времени задержки осуществлялось по схеме (рис. 2), в которой реализована стандартная методика, когда на вход компаратора поступает импульсный тестовый сигнал амплитудой 0,1 В при перевозбуждении 2, 5, 10, 20 мВ. Для устранения влияния напряжения смещения его предварительно измеряют, при этом выключают ГТС, а на другой вход компаратора подают изменяемый от ЭВМ ток в пределах  $\pm 0,4$  мА и регулируют его значение так, чтобы вероятности появления единицы и нуля на выходе компаратора были одинаковыми, что определяется ЭВМ на первом этапе измерения. Затем с помощью ЭВМ изменяют ток на величину перевозбуждения компаратора, а на второй вход подают импульсы амплитудой 0,1 В. С помощью управляемой от ЭВМ задержки добиваются того, чтобы вероятности появления единицы и нуля на выходе компаратора были одинаковыми. Для обеспечения заданной по-

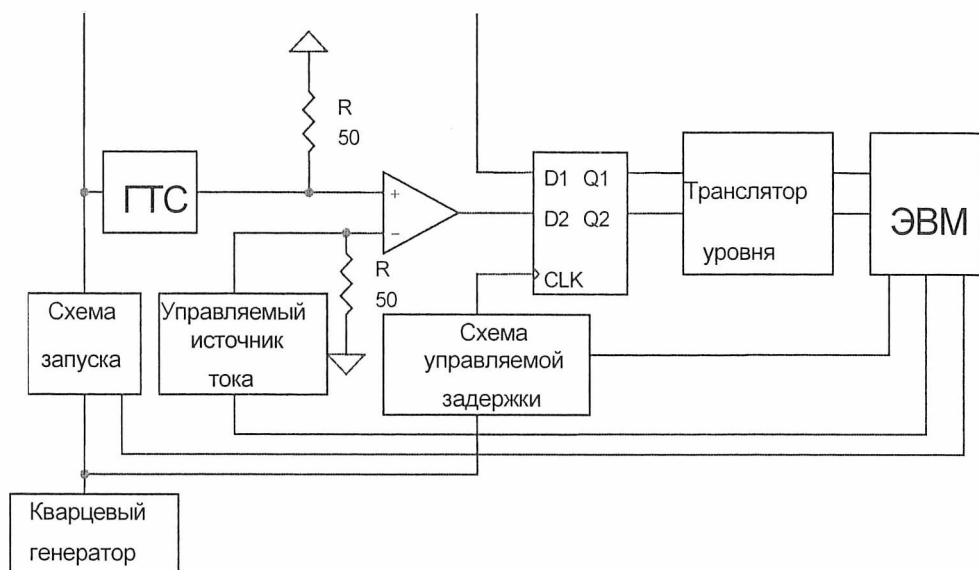


Рис. 2. Схема измерения времени задержки компараторов

грешности измерения 2–5 пс, указанные выше измерения проводят 20–30 раз, после чего все результаты измерений выстраивают в нарастающий или убывающий ряд, находят медианное значение, которое и принимают за задержку компаратора при заданном значении перевозбуждения. Измерительная система, построенная по приведенной выше схеме, эксплуатировалась на НПО «Вента» (г. Вильнюс) и показала, что шумовой джиттер не превышал 3 пс, при временной задержке исследуемых компараторов 597СА4 0,9 – 1,5 нс.

Измерение времени установления усилителей осуществляется по схеме с применением метода динамической компенсации (рис. 3). Сущность этого метода заключается в том, что система компаратор – интегратор отслеживает выходной уровень усилителя, соответствующий моменту стробирования импульсами с выхода схемы управляемой задержки. АЦП измеряет практически постоянное напряжение с выхода интегратора, которое пропорционально выходному напряжению тестируемого усилителя. За счет большой постоянной интегрирования и высокой чувствительности компараторов 597СА4 удается отслеживать выходное напряжение усилителя с эквивалентной шумовой составляющей 0,05–0,1 мВ, что при выходном уровне усилителя  $\pm 4$  В соответствует погрешности менее 0,005 %.

Рассмотренная схема позволила измерить время установления не только наиболее быстродействующих усилителей AD9617, но и устройств выборки и хранения AD9100, AD9101.

**Измерения частотных характеристик усилителей:** частоты единичного усилителя F1, скорости нарастания выходного напряжения и амплитудно-частотной характеристики осуществляют по стандартным методам измерения [7].

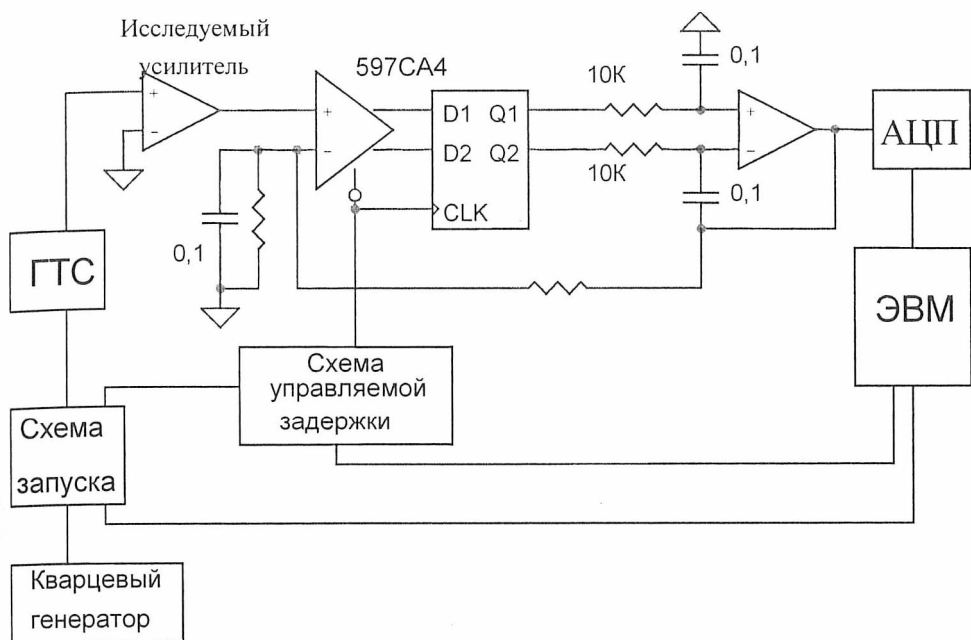


Рис.3. Схема измерения времени установления усилителей

Апертурную неопределенность устройств выборки и хранения, или АЦП считывания, измеряют путем подачи на их аналоговый вход импульсов с линейно-изменяющимся напряжением, а на вход дискретизации – подачи синхронных с ними импульсов, но сдвинутых на время  $\tau$  такой величины, чтобы импульсы дискретизации попадали на линейный участок входных импульсов. Вместо входных импульсов можно подать синусоидальный сигнал, т. к. известно, что 70 % его величины изменяется по линейному закону, а максимальную скорость нарастания легко определить по частоте и амплитуде синусоидального сигнала [8]. Для устройств выборки и хранения измеряют шумовую составляющую выходного сигнала, когда частота входного сигнала близка к граничной для данной микросхемы:

$$\overline{\Delta t^2} = \frac{\overline{\Delta U_{\text{вых}}^2}}{2\pi f A},$$

где  $\overline{\Delta U_{\text{вых}}^2}$  – среднеквадратическое значение шумовой составляющей на выходе тестируемой схемы;  $f$ ,  $A$  – соответственно частота и амплитуда синусоидального сигнала.

Для АЦП считывания вместе с входным сигналом подают постоянное напряжение, которое изменяют на заданную небольшую величину, и с помощью дополнительной схемы измеряют частоту совпадения кодов, что позволяет найти функцию распределения апертурной неопределенности АЦП, а затем и ее среднеквадратическое значение. Для оценки нелинейных динамических характери-

стик АЦП определяют соотношение сигнал/шум при воздействии на его вход синусоидального сигнала, при этом выходные сигналы АЦП восстанавливают до идеального синусоидального сигнала, минимизируют разницу между идеальным и реальным сигналами методом наименьших квадратов, после чего определяют соотношение сигнал/шум [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Doroshev V., Yamny V. // Tagung schaltkreisentwurf. Dresden, 1990. P.135.
2. Белов А. М., Дорошев В. П., Ильянок, Ямный В. Е. // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 6. С. 165.
3. Абубакер А. Д., Ямный В. Е. // Межгос. конф. по метрологии. Мн., 1994. С. 95.
4. Абубакер А. Д., Ямный В. Е. // Метрологическое обеспечение и стандартизация: Материалы науч. конф. Мн., 1992. С. 127.
5. Doroshev V., Yamny V. // Tagung schaltkreisentwurf. Dresden, 1990. P. 139
6. Doroshev V., Yamny V. // Tagung schaltkreisentwurf. Dresden, 1990. P. 137.
7. Ямный В. Е., Яриевич В. В. // Межгос. конф. по метрологии. Мн., 1994. С. 93.
8. А. с. 1229824.(СССР). Устройство для измерения апертурной неопределенности аналого-цифровых преобразователей / А. М. Белов, В. В. Шляхтин, В. Е. Ямный, А. К. Марцинкявичус. БИ. № 17. 1986.
9. Левко И. А., Нгуен Данг Куанг, Ямный В. Е. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 6. С. 156.