

отдельности, естественно, не ограничивается описанной задачей и может быть сформулирована как измерение малых токов в широком динамическом диапазоне. Цепь, в которой производится измерение, должна допускать падение напряжения на преобразователе до 15 В. Датчик обеспечивает потенциальную развязку до 7 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакуумная система ВЭПП-4.— Рабочие материалы ИЯФ СО АН СССР, 1974.
2. Гусев В. А., Захваткин М. Н., Карлинер М. М., Купер Э. А., Левичев Б. В., Нифонтов В. И., Орешков А. Д., Ощепков Ю. И., Протопопов И. Я., Сидоров В. А., Шабанов В. С., Неханевич Э. Л. Организация управления ускорительно-накопительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР при помощи ЭВМ.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Труды конференции.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.
3. Анашин В. В., Гудков Б. А., Медведко А. С. Многоканальный цифровой измеритель вакуума.— В кн.: Труды VI Всесоюзной конференции «Физика и техника высокого вакуума». Ленинград, 1974.
4. Нифонтов В. И. Радиоэлектронная аппаратура для управления ускорительно-накопительными установками при помощи ЭВМ.— Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. (Рукопись). Новосибирск, 1975.

Поступила в редакцию 9 января 1978 г.

УДК 681.325.3

Ю. Ф. МУХОПАД, А. В. ПУРТОВ

(Новосибирск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ-ТЕХНИКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АЦП

Применение цифровых методов обработки широкополосных случайных или детерминированных сигналов требует разработки аналого-цифровых преобразователей высокого быстродействия. Повышение быстродействия связано в основном с разработкой АЦП, основанных на принципах двоичного взвешивания или ослабления [1], в том числе последовательно-параллельных [2], конвейерных [3] АЦП. Увеличение скорости преобразования происходит как путем усовершенствования структурной организации, так и посредством схмотехнических и технологических усовершенствований основных узлов АЦП: компараторов и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). При повышении быстродействия АЦП определяющими становятся постоянные RC -цепей и влияние неоднородностей. С большой крутизной фронтов появляются отражения и переломы, которые увеличивают длительность переходных процессов и лишь частично ослабляются за счет специальных устройств сглаживания возникающих выбросов тока и напряжения [4], при этом появляется необходимость учета длин соединительных линий, согласования волновых сопротивлений и неоднородностей.

Одним из способов повышения быстродействия АЦП может явиться перенос АЦ-преобразования в СВЧ-область путем промежуточного преобразования аналогового сигнала в СВЧ-информацию, например в амплитуду или фазу СВЧ-сигнала [5]. Рассматривая основные элементы АЦП как полосно-пропускающие фильтры с полосой ΔF , можно грубо оценить их быстродействие: $T=1/\Delta F$ при работе устройства

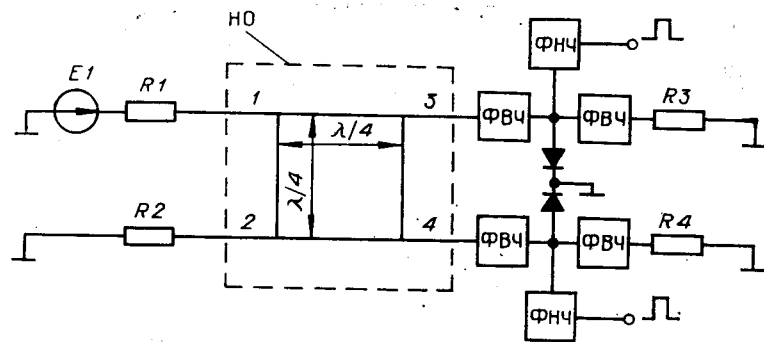


Рис. 1. Управляемый СВЧ-элемент:
НО — двухшлейфный направленный ответвитель; 1—4 — плечи НО; ФНЧ, ФВЧ — фильтры низких и высоких частот.

в центре полосы пропускания и $T=1/2\Delta F$ на верхней границе полосы пропускания. Отсутствие существенных неоднородностей в СВЧ-узлах определяет их большую широкополосность, при этом полоса пропускания 20—30% является реализуемой для большинства существующих устройств. Предварительная оценка показывает, что при такой полосе пропускания и при работе на несущей частоте свыше 3 ГГц время установления колебаний в СВЧ-узлах может быть менее 1 нс.

В зависимости от вида модуляции СВЧ-колебания могут быть построены и различные схемы АЦП, однако набор элементов, с помощью которых могут быть реализованы различные структуры, ограничен. Кратко рассмотрим некоторые из элементов СВЧ-техники, с помощью которых можно реализовать амплитудно-фазовые АЦП.

Делители и сумматоры напряжений. В качестве делителей и сумматоров напряжений на СВЧ в основном используются направленные ответвители (НО) и их разновидности — мосты: кольцевые, шлейфные (рис. 1), на связанных линиях. Различные конструкции НО позволяют реализовать любой коэффициент деления в полосе 20÷50% при малых габаритах, не превышающих длины волны в линии [6], что обеспечивает малую задержку. Экспериментальное исследование двухшлейфного моста на несимметричной полосковой линии с центральной рабочей частотой $f_0=3$ ГГц показало незначительное искажение формы радиопульса согласованным мостом и высокую скорость переходных процессов (менее 1 нс), которые практически не изменяются при рассогласовании плеч моста (рис. 2).

Мосты используются для построения различных функциональных устройств: фазовращателей, аттенюаторов и др., для чего в плечи 3 и 4 (см. рис. 1) включают управляемые элементы — диоды, а плечо 2 становится выходным. При прохождении импульсов управления через мост время установления зависит от согласования плеч моста в видеомпульсном диапазоне частот, т. е. от 0 до 1÷2 ГГц. Рассогласование в каком-либо плече ведет к увеличению времени переходных процессов от 0,5 до 2 нс, поэтому в быстродействующих схемах необходимо предусматривать отдельную цепь смещения для каждого диода в плечах моста и разрывать гальваническую связь СВЧ-диодов и цепей смещения с мостом посредством введения фильтров высоких частот.

Ключи. Для переключения или включения мощности в СВЧ-технике применяют в качестве управляющих элементов полупроводниковые диоды различных модификаций: диоды с $p-n$ -переходом, диоды с барьером Шоттки (ДБШ), pin -диоды, включаемые в СВЧ-линию передачи параллельно или последовательно и меняющие свои параметры под воздействием управляющих напряжений или токов. Бы-

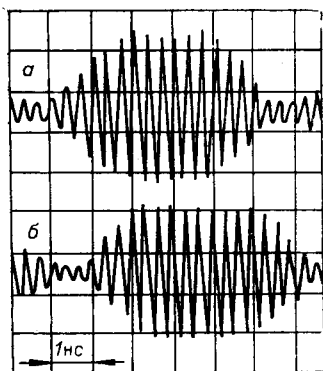


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов в двух-шейфном мостовом соединении:

а — входной радиоимпульс; б — выходной радиоимпульс.

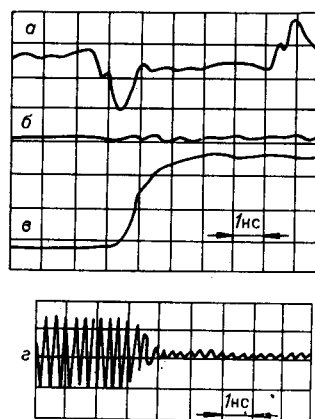


Рис. 3. Переходные процессы в ключе с двумя ограничительными диодами:

а — осциллограмма отраженного управляющего видеосигнала; б — сигнал на выходе детектора в отсутствие СВЧ-мощности; в — протектированный радиоимпульс; з — радиоимпульс, сформированный ключом.

стродействие ключей определяется как полосой пропускания конструкции, так и собственным временем включения диодов. При полосе 20% и более время задержки ключей в значительной степени определяется быстродействием самих диодов и устройств управления ими.

По электрическим параметрам наиболее приемлемыми для СВЧ-ключей являются *pin*-диоды. Однако время их переключения велико (более 20 нс). Для управления малыми уровнями СВЧ-мощности (менее 0,1 Вт) применение ДБШ, *p-n*-диодов или ограничительных диодов позволяет получить высокое быстродействие ключей. Экспериментально исследовались два ключа: с одним ДБШ и с двумя ограничительными диодами. Длительность фронтов составила 0,5 нс и 1 нс (рис. 3, з) соответственно, хотя следует отметить, что полная длительность переходных процессов, носящих затухающий колебательный характер, была ~ 3 нс, что определилось узкополосностью цепей смещения исследуемых ключей и реакцией этих цепей на скачок управляющего напряжения, длительность фронта которого составила 180 пс (см., например, рис. 3, б). При детектировании происходит некоторое усреднение и время установления составляет 2 нс для обоих ключей при постоянной времени детектора 0,7 нс (см. рис. 3, в).

Фазовращатели. При использовании в АЦЦ фазовой модуляции непрерывное изменение фазового сдвига осуществляется путем плавного изменения емкости варакторов, включенных в СВЧ-линию [7, 8], а также на основе перестраиваемых с помощью варакторов широкополосных полосно-пропускающих фильтров, которые в зависимости от величины перестраиваемой емкости могут быть и фазовращателями, и выключателями [9]. Дискретные фазовращатели строятся на основе плавных фазовращателей или рассмотренных выше ключей в сочетании с гибридными соединениями — мостами или циркуляторами [6, 7].

Быстродействие фазовращателей определяется элементами — ключами, мостами. Для варакторов СВЧ-диапазона абсолютные величины емкостей составляют 0,5—3 пФ и время перезаряда их не превышает 1,5 нс при 200-омной цепи смещения, поэтому быстродействие варакторных фазовращателей будет определяться формой управляющего импульса напряжения необходимой амплитуды.

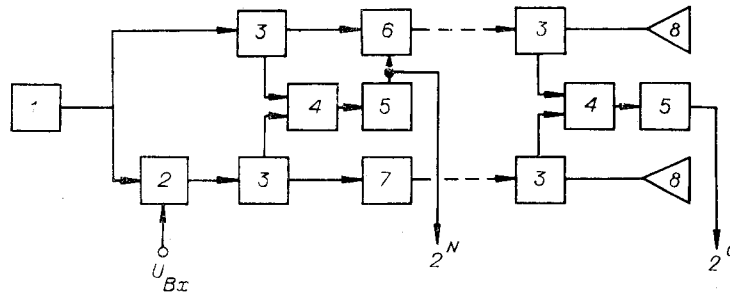


Рис. 4. Конвейерный АЦП:

1 — генератор СВЧ; 2 — преобразователь «напряжение — фаза»; 3 — направленные ответвители; 4 — компараторы; 5 — формирователи; 6 — фазовращатели; 7 — линии задержки; 8 — оконечные нагрузки.

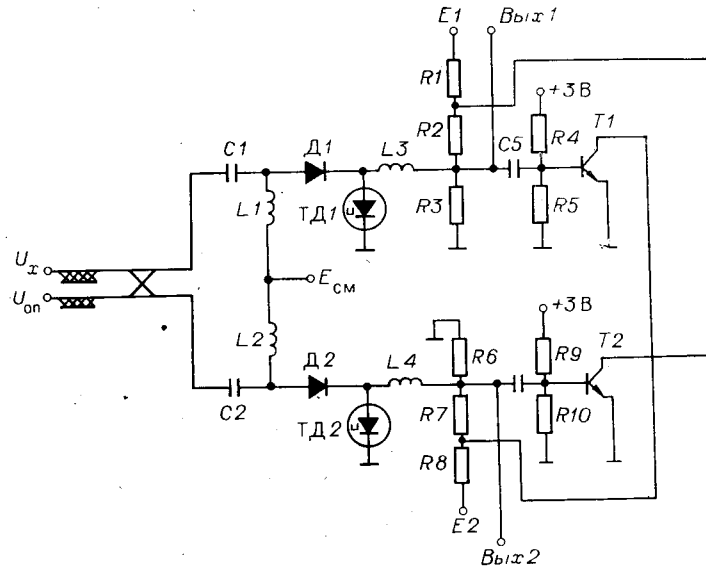


Рис. 5. Фазовый компаратор.

Применение методов параметрического синтеза и оптимизации [10] для расчета цепей смещения и согласования, а также выполнение этих цепей на сосредоточенных элементах [6] позволяют расширить полосы пропускания устройств СВЧ, разделить спектры управляющих и СВЧ-сигналов, развязывая тем самым практически полностью цепи смещения и СВЧ-линию, в то же время оставляя достаточно широкую полосу пропускания этих сигналов. При этом следует ожидать дальнейшее уменьшение времени переходных процессов в рассмотренных выше устройствах СВЧ. Методы синтеза СВЧ-цепей позволяют на основе экспериментально измеренного импеданса варакторов проектировать линейные фазовращатели с малыми колебаниями выходной мощности $\pm 0,06$ дБ [11].

Конвейерный АЦП. Одна из возможных схем АЦП с применением рассмотренных выше элементов СВЧ представляет собой каскадный фазовый АЦП с постоянным порогом и двоичным кодом (рис. 4). Входное напряжение $U_{вх}$ преобразуется плавным линейным фазовращателем в фазу СВЧ-колебания, которая определяется затем последовательностью каскадов, каждый из которых содержит компаратор, управляющий через формирователь дискретным фазовращателем с соответствующим фазовым сдвигом. В первом каскаде АЦП происходит

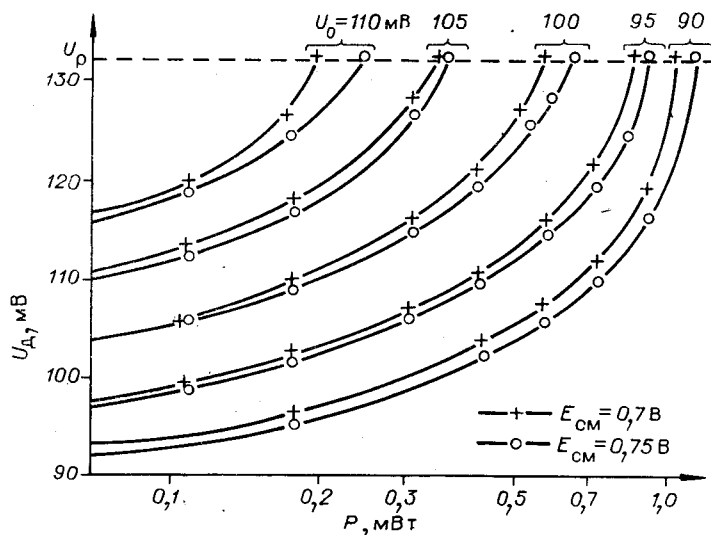


Рис. 6. Зависимость напряжения на ТД от величины СВЧ-мощности для различных условий:
 U_0 — напряжение на ТД в отсутствие СВЧ-мощности; $E_{см}$ — напряжение смещения на СВЧ-диоде.

сравнение фазы измеряемого сигнала с величиной сдвига фазы 180° , в результате к фазе опорного сигнала добавляется или вычитается 90° . Схема сравнения второго каскада управляет набегом фазы $\pm 45^\circ$ и т. д. по двоичному закону. Введение в схему линии задержки позволяет реализовать конвейерный принцип преобразования информации, при котором полное время преобразования равно быстродействию одного разряда T_p , а весь результат задержан на время NT_p для N -разрядного АЦП. Рассматриваемый АЦП может применяться как без устройств выборки и хранения (УВХ), при этом апертурное время равно времени преобразования, так и с УВХ, при этом полное использование возможностей АЦП по быстродействию требует УВХ с апертурным временем менее 1 нс [12]. В каждом каскаде часть мощности опорного и измеряемого сигналов через НО на связанных линиях поступает на соответствующие входы быстродействующего фазового компаратора [13], модифицированная схема которого приведена на рис. 5. Пороговые детекторы, образуемые парами диодов Д и туннельных диодов ТД, позволяют производить регулировку в широких пределах мощности, поступающей на ТД₁, и чувствительности компаратора (рис. 6). Чувствительность всех компараторов одинаковая, поэтому НО для каждого каскада имеет определенный коэффициент деления с учетом затухания, определяемого как поглощением мощности в предыдущих компараторах, так и потерями в соединительных линиях. При необходимости выравнивания амплитуд во входных плечах моста в пределах 1—3 дБ в каждый компаратор может быть введен подстроечный аттенуатор из резистивной пленки с сопротивлением 180—300 Ом/□, наклеиваемой непосредственно на полосковую линию. Окончательная настройка компараторов производится регулировкой смещений на туннельных и СВЧ-диодах.

Один выход компаратора нагружен на формирователь, вырабатывающий необходимое для управления фазовращателем напряжение смещения. Формирователь представляет собой переключатель тока с устройством смещения уровня. Управление от низкоомного источника напряжения, каким является ТД, и малая амплитуда формируемых

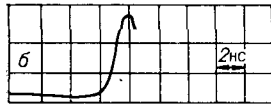


Рис. 7. Осциллограмма переходных процессов в формирователе:

а — импульсы на входе формирователя; б — сформированный импульс.

импульсов определяют высокое быстродействие выполненном на несимметричной полосковой линии с ограничительными диодами, включенными в плечи 3 и 4 на одинаковом расстоянии от разомкнутых концов ($R_3=R_4=\infty$), а выходом являлось плечо 2, нагруженное на вход следующего каскада.

Быстродействие всего разряда T_p можно определить как сумму времени нарастания фронта выходного радиоимпульса T_ϕ с временем задержки T_3 , которое определяется электрической длиной соединительных линий и задержкой включения элементов:

$$T_\phi = \sqrt{t_{\phi K}^2 + t_{\phi T}^2 + t_{\phi \Phi}^2}, \quad T_3 = t_{3K} + t_{3T} + t_{3\Phi},$$

где $t_{\phi K}$, t_{3K} — длительность фронта выходного импульса компаратора и задержка включения компаратора соответственно; $t_{\phi T}$, t_{3T} — то же для токового переключателя; $t_{\phi \Phi}$, $t_{3\Phi}$ — для фазовращателя. Экспериментальные значения: $t_{3T}=0,4$ нс; $t_{\phi T}=1,7$ нс (см. рис. 7, а, б); $t_{\phi \Phi}=1$ нс (см. рис. 3); $t_{3\Phi}=0,3$ нс. Время $t_{\phi K}$ определяется переключением туннельного диода компаратора и не превышает 0,8 нс для диода ЗИ201Е при работе на 50-омную нагрузку. При этих значениях ($T_\phi=2,3$ нс, $T_3=(t_{3K}+0,7)$ нс) общее быстродействие разряда рассматриваемой экспериментальной конструкции $T_p=(t_{3K}+3)$ нс и определяется в значительной степени временем задержки включения компаратора t_{3K} под воздействием радиоимпульса.

Зависимость быстродействия одного разряда T_p от фазового скачка относительно порогового уровня, регулируемого плавным фазовращателем ФВ-8, представлена на рис. 8, кривая 1. Предельное быстродействие составило ~ 3 нс, что находится в хорошем соответствии с предварительной оценкой. Уровень мощности в опорном и измерительном каналах не превышал 1 мВт, а напряжение смещения на ТД находилось в пределах $(0,7 \div 0,85) U_p$, где U_p — напряжение, соответствующее пику тока ТД. Время переходных процессов схемы, определяющее ее готовность к следующему сравнению, составило 7 нс. Погрешность АЦП определяется разбалансом амплитуд на входе компаратора, а также его чувствительностью. Основные требования предъявляются к постоянству амплитуд колебаний опорного и измерительного сигналов, нестабильность амплитуды в каком-либо канале $\pm 0,1$ дБ дает погрешность $\pm 0,75^\circ$. Чувствительность компаратора увеличивается при повышении уровней мощностей на входе и при 1 мВт составляет 0,2 дБ ($\pm 1,5^\circ$) для начального смещения $U_0=95$ мВ на

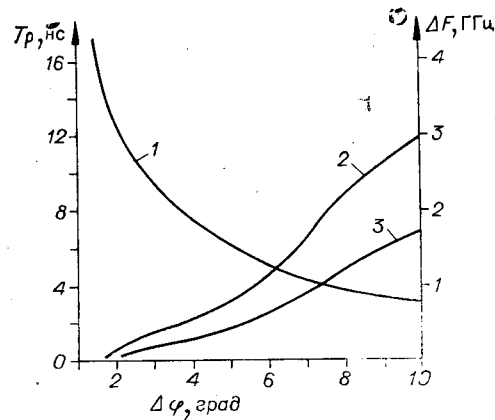


Рис. 8. Зависимость времени преобразования T_p и полосы пропускания линий задержки от чувствительности $\Delta\phi$:

1 — зависимость быстродействия одного разряда от чувствительности; 2 и 3 — полоса пропускания линий задержки для кабелей РК50-4-11 и РК50-2-11 соответственно.

ТД, что достаточно для обеспечения устойчивой работы компаратора. Однако повышение мощности СВЧ на входе компараторов ограничено, поскольку ведет к общему увеличению мощности в тракте измерительного сигнала, что усложняет требования как к плавному, так и к дискретным фазовращателям, и тем самым к уменьшению быстродействия ключей или потере их работоспособности вообще, например ключей с ДБШ типа ЗА531, уровень рабочей мощности которых ограничен 5—10 мВт.

Так как время преобразования зависит от требуемой точности, то время линии задержки (ЛЗ) выбирается в соответствии с необходимой разрядностью. При этом ЛЗ в виде кабеля вносят искажения, сужают полосу пропускания СВЧ-тракта измеряемого или опорного сигналов в зависимости от того, в какой канал включены ЛЗ. Оценим полосу пропускания ЛЗ в зависимости от быстродействия разряда. Общая длина линий задержки, включенных в N -разрядный АЦП,

$$L = T_p (N - 1) / t_3, \quad N = \log_2 (360^\circ / \Delta\varphi),$$

где T_p — время преобразования одного разряда, соответствующее данной чувствительности; t_3 — время задержки на единицу длины кабеля, равное 4,7 нс/м для кабеля с фторопластовым заполнением.

Для экспериментально снятой зависимости времени преобразования T_p от чувствительности $\Delta\varphi$ (рис. 8, кривая 1) полоса пропускания ЛЗ (кривые 2, 3) [14] при чувствительности хуже 3—4° превышает возможную частоту дискретизации и не влияет на качество преобразования и лишь при большей чувствительности (менее 3°) ЛЗ ограничивает полосу пропускания СВЧ-тракта, определяя тем самым быстродействие АЦП.

Сверхвысокочастотная часть разряда АЦП размещена на трех подложках из поликора размером 2×48×60. Видеоимпульсная часть на дискретных элементах выполнена на стеклотекстолитовой плате размером 120×120. Переход на более высокую несущую частоту (с 3 до 10 ГГц) позволит разместить СВЧ-часть разряда на одной плате 60×48, а применение интегральных транзисторных сборок уменьшит, по крайней мере вдвое, габариты остальной части.

Экспериментальные исследования переходных процессов элементов СВЧ-техники и одного разряда АЦП подтверждают возможность построения сверхбыстродействующих АЦП с временем преобразования менее 15 нс, определяемым в основном быстродействием компаратора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галимова Р. Т. Вопросы построения высокоточных и быстродействующих ЦАП и компараторов. — «Зарубеж. радиоэлектроника», 1976, № 5, с. 90—101.
2. Вьюхин В. Ю. Параллельно-последовательный аналого-цифровой преобразователь наносекундного диапазона. — «Автометрия», 1973, № 3, с. 113—116.
3. Беломестных В. А., Вьюхин В. Ю., Касперович А. Н., Литвинов Н. В., Солоненко В. И. Конвейерный аналого-цифровой преобразователь. — «Автометрия», 1975, № 1, с. 56—69.
4. Бахтияров Г. Д., Дикий С. М. Аналого-цифровые преобразователи. — «Зарубеж. радиоэлектроника», 1975, № 1, с. 52—90.
5. Веников Г. В. Сверхбыстродействующие вычислительные устройства. М., «Энергия», 1966.
6. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М., «Сов. радио», 1976.
7. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. Под ред. Мальского И. В., Сестрорецкого Б. В. М., «Сов. радио», 1969.
8. Шандыбин Г. Н., Косогов А. М., Вагин В. А., Кузнецова Л. Б. МДП-варакторы для СВЧ техники. — «Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1977, вып. 3 (113), с. 71—87.
9. Аубакиров К. Я., Мищенко П. П. Расчет на ЭВМ широкополосных фазовращателей ДЦМ диапазона. — В кн.: XX Областная научно-техническая конференция (Тезисы

- докладов, секция радиотехническая.) Новосибирск, изд. НТО РЭС им. Попова, 1977, с. 42—43.
10. Козлов В. И., Юфит Г. А. Проектирование СВЧ устройств с помощью ЭВМ. М., «Сов. радио», 1975.
 11. Бородулин А. А. Построение и экспериментальное исследование оптимального отражательного фазовращателя с плавной электрической перестройкой, содержащей один управляемый элемент.— В кн.: Антенны. Под ред. Пистолькорса А. А. Вып. 19. М., «Связь», 1974, с. 148—156.
 12. Касперович А. Н., Литвинов Н. В. О целесообразности использования двухтактных устройств выборки и хранения.— «Автоматика», 1973, № 3, с. 98—104.
 13. Пуртов А. В., Мухопад Ю. Ф. Быстродействующий фазовый компаратор СВЧ диапазона.— ПТЭ, 1978, № 1, с. 109—110.
 14. Глебович Г. В., Ковалев И. П. Широкополосные линии передачи импульсных сигналов. М., «Сов. радио», 1973.

Поступила в редакцию 25 мая 1977 г.;
окончательный вариант — 16 января 1978 г.

УДК 681.325.3

А. Н. КАСПЕРОВИЧ, Ю. В. ШАЛАГИНОВ

(Новосибирск)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЦП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНОЙ СВЕРТКИ СИГНАЛОВ

В последние годы в ряде работ [1—5] описаны АЦП, в которых используется преобразование входных сигналов по принципу амплитудной свертки*. В АЦП, основанных на этом принципе, возможно получение высокого быстродействия при сравнительно небольшом объеме оборудования. Однако особенности проектирования таких АЦП в отечественной литературе практически не освещены. Авторы в настоящей работе рассматривают основные структурные схемы сверхбыстродействующих АЦП с использованием амплитудной свертки и ряд принципиальных схем узлов АЦП, дают оценку объема оборудования и динамических свойств таких АЦП.

Кратко рассмотрим принцип преобразования вида «амплитудная свертка». На рис. 1 изображена амплитудная характеристика устройства амплитудной свертки (УАС), с помощью которого осуществляется это преобразование. Сигнал на выходе УАС описывается следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_{\text{вх}} - iQ & \text{для } i = 0, \pm 2, \pm 4, \pm \dots; \\ (i + 1)Q - U_{\text{вх}} & \text{для } i = \pm 1, \pm 3, \pm \dots, \end{cases}$$

где $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ — значения входного и выходного сигналов; Q — выходной диапазон УАС (приведенный ко входу); i — номер участка на характеристике УАС.

В общем случае число изломов на амплитудной характеристике УАС может быть различным. Простейшим вариантом УАС является выпрямитель знакопеременного сигнала, характеристика которого имеет всего один излом. Этим УАС осуществляется однократная свертка относительно нулевого уровня.

Из АЦП, основанных на применении УАС, наиболее просто реализуется преобразователь, состоящий из последовательного соединения

* В некоторых работах, например в [3], они называются АЦП с использованием непрерывно-логических функций.