

УДК 621.374.3

© В. Г. Деменков, Б. В. Журавлев, П. В. Деменков

ПОВЫШЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ В АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВАХ ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ

Представлены косвенные методы измерения коротких интервалов времени и обсуждается проблема нелинейности изменения их масштаба. Предложены варианты схемотехнических решений, снижающие уровень таких искажений в устройствах расширения интервалов времени. Применение этих схем в составе временных аналого-цифровых преобразователей обеспечило им интегральную нелинейность не хуже 0.05 %.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение сферы применения электронных методов ядерной физики тесно связано с техникой измерения интервалов времени. Среди них как направление в наносекундной электронике нашли место методы измерения малых длительностей косвенным путем, техника которых заняла особое положение [1]. Ее развитие и совершенствование связано с исследованиями, развернутыми в физике высоких энергий, лазерной и электронной технике, в биотехнологии, физике быстрых нейтронов и т. д.

Не умоляя успехов и достижений в эволюции цифровой схемотехники (повышение ее быстродействия и скорости счета), отметим, что косвенные методы измерения коротких интервалов времени все еще остаются весьма востребованными. Наиболее широкое применение нашел метод преобразования время—амплитуда ($t-A$), где конденсатор служит элементом памяти, фиксирующим информацию о поступившей длительности в виде амплитуды. Такую ситуацию можно объяснить с одной стороны достаточно простой реализацией метода, а с другой — значительным прогрессом в сфере аналого-цифрового преобразования данных, а также развитием микроэлектронных средств этого направления [2].

Дополнение схемы $t-A$ цепью разряда конденсатора создало метод расширения интервалов, типа ($t-A-T$). Если добавить этап преобразования время—код, получаем еще одну разновидность косвенного метода измерения интервалов типа время—амплитуда—время—код ($t-A-T-C$). При этом, по мнению специалистов, исключается двухстадийность запоминания аналоговой информации. Особенно такой не всегда благоприятный аспект имеет место в способе $t-A$, если в дальнейшем используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) вилкинсоновского типа [3]. Устраняется влияние негативных факторов, связанных с вход-

ными цепями АЦП, т. к. изменение масштаба времени в схеме $t-A-T$ происходит за счет заряда и разряда одного и того же конденсатора разными токами.

Специфика такой версии косвенного метода измерения интервалов времени состоит в том, что изменение масштаба времени в ней осуществляется посредством аналоговой трансформации длительности интервала. Метод используется в практике создания различных модификаций измерителей временных интервалов (ИВИ), широко применяемых в составе измерительных систем и комплексов разного плана и уровня. Характерной особенностью таких средств электронной техники является то, что они ориентированы на измерение и регистрацию распределения интервалов с нано- и субнаносекундным разрешением.

Структура ИВИ и состав ее в виде электронных устройств приведены на рис. 1. Интервал, заключенный между сигналами СТАРТ и СТОП, выделяется схемой селекции измеряемого временного интервала (СИВИ) в виде сигнала длительностью t . В схеме расширения временных интервалов (РВИ) он увеличивается в k раз, а в устройстве управления (УУ) его используют для формирования слу-

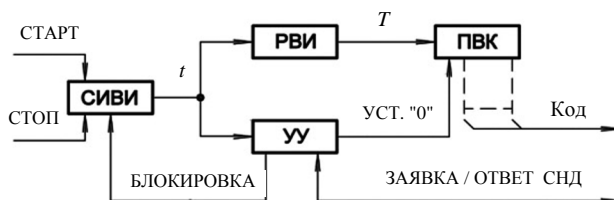


Рис. 1. Структурная схема измерителя временных интервалов. ПВК — преобразователь время—код; РВИ — расширитель временных интервалов; СИВИ — селектор измеряемого временного интервала; СНД — система накопления данных; УУ — устройство управления

жебных сигналов, обеспечивающих функционирование ИВИ в целом.

Трансформированный схемой РВИ исходный сигнал интервала времени, длительность которого теперь равна $T = kt$, поступает на схему преобразователя время—код (ПВК). Полученная с его помощью кодовая информация о длительности зарегистрированного интервала времени, передается в систему накопления данных (СНД). Не затрагивая структуру интерфейса связи, т. к. это не является предметом рассмотрения в этой работе, заметим, что факт передачи кода из ИВИ в СНД сопровождается и фиксируется обменом между ними сигналами ЗАЯВКА/ОТВЕТ схемы УУ.

В измерителях данного вида, как уже отмечалось, осуществляется аналоговая трансформация длительности интервала. Параметры этого процесса определяются в основном устройством РВИ типа $t-A-T$, функциональная схема которого представлена на рис. 2. Поступивший сигнал интервала времени t замыкает ключ (Кл), подключая источник тока заряда (ИТЗ). Так как источник тока разряда (ИТР) не коммутируется, то конденсатор (С) заряжается разностью токов ($I_3 - I_p$), которая отключает схему фиксации исходного потенциала (ФИП) на емкости С. Выполняется первый этап преобразования $t-A$, т. е. время—амплитуда. По окончании входного интервала начинается разряд конденсатора С, который завершается включением схемы ФИП. Этот процесс относится ко второму этапу преобразования $A-T$, т. е. амплитуда—длительность. Суммарное время T заряда и разряда емкости С выделяется схемой формирования выходного временного интервала (ФВВИ).

Основным параметром схемы РВИ принято считать коэффициент трансформации k . Он указывает, во сколько раз была увеличена исходная длительность, и определяется как: $k = T/t = I_3/I_p$. Именно им задается минимальная ширина канала ИВИ,

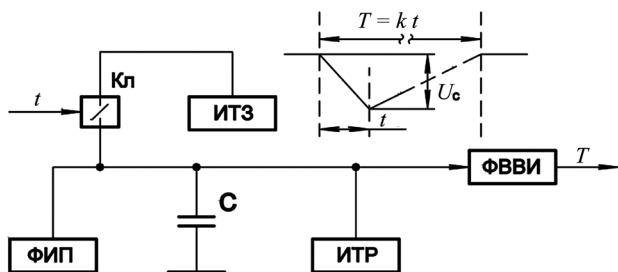


Рис. 2. Функциональная схема РВИ типа $t-A-T$. ИТЗ — источник тока заряда; ИТР — источник тока разряда; Кл — ключ; С — конденсатор; ФВВИ — формирователь выходного временного интервала; ФИП — фиксатор исходного потенциала

которая равна $\Delta = T_0/k$, где T_0 период следования опорных импульсов генератора в ПВК [1, 3]. Стабильность данного коэффициента имеет принципиальное значение для ИВИ, однако не менее важным параметром измерителя служит линейность изменения масштаба времени.

ПРОБЛЕМА НЕЛИНЕЙНОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА. СПОСОБЫ ЕЕ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Изначальное напряжение на конденсаторе С устройства РВИ поддерживается схемой ФИП. Ее отключение, а точнее запираение, при поступлении исходного интервала идет нелинейно, ухудшая начальный участок регистрируемого временного спектра. Его величина нередко доходит до десятков наносекунд и в ряде случаев может составлять 15÷20 % от диапазона измерений [4]. Непростая ситуация создается и на конечном этапе расширения, когда схема ФИП начинает открываться. Процесс тоже носит нелинейный характер, усугубляемый малой величиной тока разряда и медленным изменением потенциала на конденсаторе. В измерителях этого типа такие процессы характеризуются величиной интегральной нелинейности, которую стремятся сделать минимальной [1, 3].

Основным активным элементом схемы ФИП является либо диод [1], либо транзистор [5]. В исходном состоянии они находятся в открытом состоянии и запираются на весь этап изменения длительности поступившего интервала, т. е. его преобразования. Чтобы снизить нелинейность расширения при использовании в качестве элемента ФИП диода, его через усилитель охватывают обратной связью [3, 6]. Образуется так называемый "усиленный" диод с увеличенной крутизной вольт-амперной характеристики, что положительно сказывается на выделении конца преобразования. Однако использование такого варианта не решает проблему нелинейности преобразования интервалов в целом. Нужно отметить обеспокоенность специалистов, некоторые из которых считают, что погрешности измерений, связанные с нелинейностями такого вида, наиболее трудно устранимые, т. к. на практике их невозможно ликвидировать какой-либо регулировкой [7].

При изменении масштаба времени этим методом более действенным подходом к вопросу повышения линейности расширения интервалов, по мнению авторов, служит организация и поддержание исходного виртуального потенциала (ИВП) на конденсаторе. Такой потенциал создается активным воздействием на элементы схемы расширителя типа $t-A-T$ путем использования петли обратной связи, влияние которой в процессе заряда и разряда устраняется. Для поддержания ИВП конденсатора

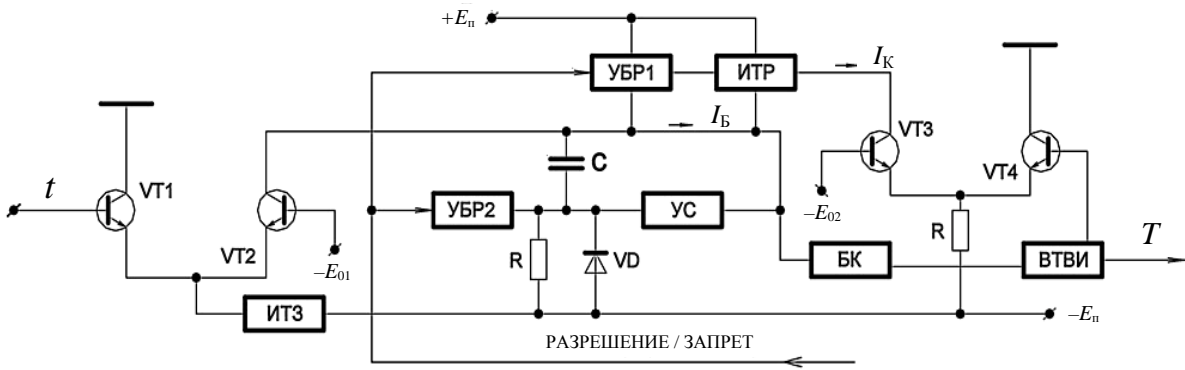


Рис. 3. Упрощенная схема РВИ типа $t-A-T$ с вариантом поддержания ИВП путем частичной компенсации тока разряда.
 БК — буферный каскад; ВТВИ — схема выделения трансформированного временного интервала; ИТЗ — источник тока заряда; ИТР — источник тока разряда; С — конденсатор; УБР1(2) — устройство быстрого разряда; УС — усилитель; VD — диод (КД-512А); VT1÷VT4 — транзисторы (КТ325Б)

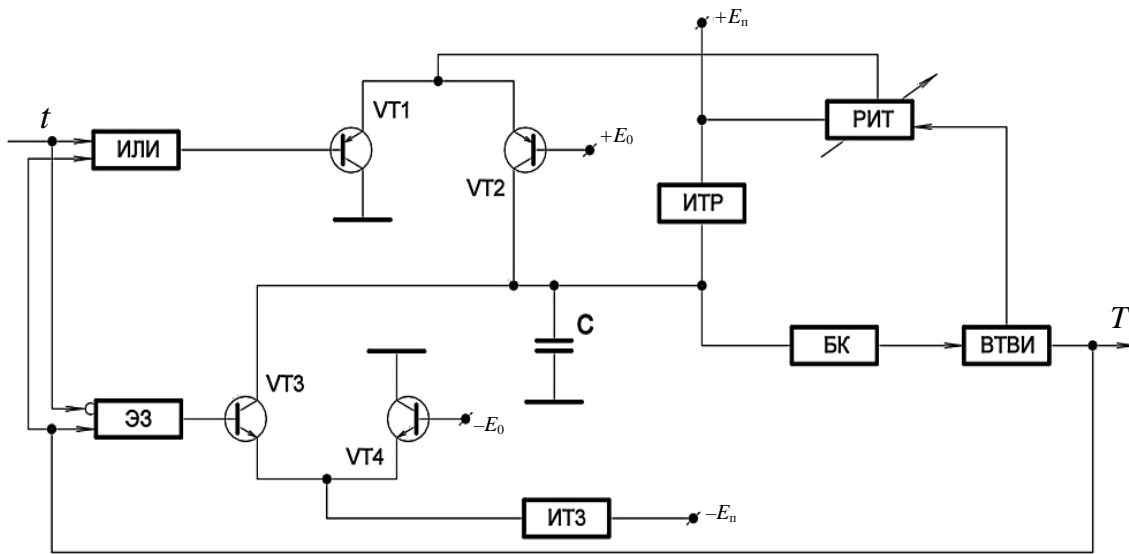


Рис. 4. Упрощенная схема РВИ типа $t-A-T$ с версией поддержания ИВП путем компенсации тока заряда.
 БК — буферный каскад; ВТВИ — схема выделения трансформированного временного интервала; ИЛИ — логический элемент; ИТЗ — источник тока заряда; ИТР — источник тока разряда; РИТ — регулируемый источник тока; С — конденсатор; ЭЗ — элемент запрета; VT1, VT2 — транзисторы (КТ363Б); VT3, VT4 — транзисторы (КТ325Б)

используются дополнительные регулируемые источники токов, компенсирующие или ток заряда, или разряда.

Рассмотрим схемы РВИ типа $t-A-T$, где реализованы разные версии поддержания ИВП на конденсаторе. В одной (см. рис. 3) отключен ток заряда, а ток разряда подключен, и поддержание ИВП конденсатора происходит частичной его компен-

сацией. В рабочем состоянии режим ИВП создается схемой выделения трансформированного временного интервала (ВТВИ) и парой транзисторов VT3 и VT4, работающей в линейном режиме. Изменяя ток коррекции I_K , удерживают ИВП конденсатора С, регулируя ток балансировки $I_B = I_P - I_K$, протекающий в исходном состоянии через токовый выход усилителя УС.

Приход сигнала интервала t меняет состояние транзисторов VT1 и VT2, открывая VT2. Конденсатор C заряжается током I_3 схемы ИТЗ, и усилитель УС запирается падением напряжения от I_3 на прямом сопротивлении диода VD, отключая ток балансировки I_b . Буферный каскад БК передает эти изменения на схему ВТВИ, которая выключает ток коррекции I_k , формируя начало расширенной длительности T , разрывая петлю обратной связи. По окончании интервала t ток заряда I_3 отключается и начинается процесс разряда. Диод VD запирается, включая усилитель УС, токовый выход которого следит за потенциалом на конденсаторе C . Имеет место эффект Миллера [8], т. к. конденсатор включен в цепь обратной связи усилителя, обеспечивая тем самым высокую линейность его разряда. Процесс разряда током $I_p/K + 1$ (где K — коэффициент усиления усилителя УС) идет до тех пор, пока не сработает пороговый элемент схемы ВТВИ. Включается ток коррекции I_k , восстанавливая в схеме режим ИВП. Процесс установки режима идет весьма быстро за счет кратковременной положительной обратной связи, разрываемой гистерезисом порогового элемента. На выходе схемы РВИ выделяется интервал времени величиной $T = (K + 1) t I_3 / I_p$, поступающий на схему ПВК.

Процесс разряда конденсатора сигналом по входу РАЗРЕШЕНИЕ/ЗАПРЕТ может быть прерван в любой момент времени. Сигнал включает устройства быстрого разряда (УБР1 и УБР2). Один из них (УБР1) резко увеличивает ток разряда, а другой (УБР2) шунтирует входные цепи усилителя УС, выключая его. Появление сигнала на этом входе связано с нарушением условий измерений или режима работы измерителя. На выходе схемы ВТВИ выделяется интервал не более $(3 \div 5)t$, снижая мертвое время блока ИВИ.

Другая версия поддержания ИВП в составе РВИ типа t - A - T приведена на рис. 4. Данный режим в схеме создается ИТЗ, который подключен открытым транзистором VT3 переключателя тока (VT3, VT4) к емкости C . Состояние ИВП на ней сохраняется петлей обратной связи, замкнутой через БК, схему ВТВИ и дополнительный компенсирующий ток ИТЗ регулируемый источник тока (РИТ). Этот источник тока, включенный параллельно ИТР, может отключаться с помощью переключателя тока (VT1, VT2).

Выходной сигнал логического элемента ИЛИ, открывая транзистор VT1, разрывает петлю обратной связи, отключая РИТ на время заряда и разряда емкости устройства РВИ. С помощью схемы элемента запрета (ЭЗ) спустя входную длительность t ИТЗ отключается переключателем тока (VT3, VT4) от конденсатора. В таком случае емкость, заряженная током $(I_3 - I_p)$ в течение интервала t , в последующем разряжается ИТР. Ее разряд завершается при срабатывании порогового

элемента в схеме ВТВИ, фиксируя на выходе расширенный интервал времени T . При этом оба переключателя токов (VT1, VT2) и (VT3, VT4) возвращаются в исходное состояние, восстанавливая петлю обратной связи в схеме РВИ, создавая и обеспечивая режим ИВП на ее накопительном конденсаторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обе схемы РВИ, как и их модификации, неоднократно использовались в составе измерительных модулей временного аналого-цифрового преобразования типа ВАЦП, выполненных в стандарте САМАС. В обоих случаях их интегральная нелинейность практически в 100 % диапазона измерений, который задавался и находился в пределах $100 \div 2000$ нс, была не хуже 0.05 %. Диапазон измерений определяется в основном периодом следования сигналов СТОП ускорителя, работающего в импульсном режиме. Модули данного типа стали ядром измерительных систем спектрометров быстрых нейтронов по времени пролета, функционирующих на базе ускорительного комплекса института [9]. Рассмотренные структуры РВИ типа t - A - T достаточно универсальны и найдут применение в измерителях интервалов времени, ориентированных на решение задач измерений в субнаносекундной области с высокой линейностью преобразования.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ и Калужского научного центра (грант 07-02-96400)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 216 с.
2. Федорков Б.Т., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
3. Ковальский Е. Ядерная электроника. М.: Атомиздат, 1972. 360 с.
4. Kostamovaara J. and Myllyla R. A Time-to-Amplitude Converter with Constant Fraction Discriminator // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1985. V. 239, N 3. P. 568–578.
5. Зинов В.Г., Марьин Н.А., Селиков А.В. Многодиапазонный преобразователь время-код // ПТЭ. 1993. № 6. С. 111–114.
6. Мерзляков С.И., Стрекаловский Э.В., Цурин И.П. 4-канальный субнаносекундный преобразователь время-код // ПТЭ. 1995. № 5. С. 102–106.

7. Чернов В.Г. Устройства ввода-вывода аналоговой информации для цифровых систем сбора и обработки данных. М.: Машиностроение, 1988. 184 с.
8. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1967. 542 с.
9. Кузьминов Б.Д. Роль комплекса ускорителей ГНЦ РФ ФЭИ в обеспечении ядерных технологий ядерными данными // Сборн. труд. XIII Междунар. конф. по электростат. ускор. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2000. С. 5.

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики (Деменков В.Г.)

Государственный научный центр РФ Физико-энергетический институт, г. Обнинск (Журавлев Б.В., Деменков П.В.)

Материал поступил в редакцию 18.06.2007.

IMPROVEMENT OF TIME INTERVAL EXTENSION LINEARITY IN TIME-INTERVAL ANALOGOUS TRANSFORMERS

V. G. Demenkov¹, B. V. Zhuravlev², P. V. Demenkov²

¹*Obninsk State Technical University of Nuclear Power Engineering*

²*RF State Research Center Physical-Technical Institute, Obninsk*

The paper considers indirect methods of measuring short time intervals and discusses nonlinear effects of their scaling. Some solutions for circuit configuration aimed at reducing such distortions in time interval expanders are presented. Those circuits, being integrated into the analog-to-digital time converters, guarantee integral nonlinearity not higher than 0.05 %.