

6
А-36

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И.ЛЕНИНА

ЯКУШЕВ А. К.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ
В ДИАПАЗОНЕ 10^{-11} : 10^{-8} СЕК

Диссертация написана на русском языке

05.260 – Приборы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МИНСК--1971

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА

Я К У Ш Е В А . К .

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ
В ДИАПАЗОНЕ 10^{-11} ÷ 10^{-6} СЕК

(диссертация на русском языке)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

05.260 - Приборы экспериментальной физики

Минск, 1971

Работа выполнена в Проблемной лаборатории физики полупроводников и применения полупроводниковой техники Белгосуниверситета имени В.И.Ленина

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
А.Ф.ЧЕРНЯВСКИЙ (сектор полупроводниковой электроники, БГУ им.В.И.Ленина, г.Минск)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук В.В.ИЗОУ
(кафедра радиофизики и электроники СВЧ, БГУ им.В.И.Ленина, гор.Минск);

кандидат физико-математических наук
Е.А.МЕЛЕНКО (ИАЭ им.Курчатова, г.Москва)

Оппонирующая организация:

институт электроники и вычислительной техники АН Латвийской ССР, г. Рига.

Автореферат разослан "13" декабря 1971 г.

Защита диссертации состоится на заседании Совета по присуждению ученых степеней по физико-математическим наукам (физика) Белорусского ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им.В.И.Ленина.

О дне и времени защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск". С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГУ им.В.И.Ленина. Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: г.Минск, университетский городок, БГУ им. В.И.Ленина, ученому секретарю Совета.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

М. П. ХАЛИМАНОВИЧ

(М. П. ХАЛИМАНОВИЧ)

Академия наук Белорусской ССР

6
A 36

В современной физике и технике многоканальный анализ стал одним из наиболее важных и эффективных способов решения многих сложных научных и технических задач. Прецизионное измерение временных интервалов $< 10^{-6}$ сек. необходимо в экспериментальной ядерной физике, оптике, радиолокации, радиоизмерительной технике, лазерной дальномерной технике, информационных лазерных линиях связи, радиоастрономии и т.д. Новые задачи, возникающие в упомянутых и других областях науки и техники, настоятельно требуют поиска более совершенных средств измерения малых временных интервалов и их статистических распределений.

В связи с этим представляет значительный интерес всестороннее исследование принципиальных возможностей существующих методов многоканального анализа временных интервалов $< 10^{-6}$ сек, использующих преобразование время-амплитуда-код (ВАК) и верньерное преобразование, а также разработка новых прецизионных приборов для измерения времени в диапазоне $10^{-11} + 10^{-6}$ сек.

В работе обосновываются наиболее целесообразные общие принципы построения многоканальных временных анализаторов (м.в.а.) широкого применения, при этом особое внимание уделяется поиску эффективных способов обработки потоков случайных сигналов на входе приборов и способов преобразования время-код, так как именно этими двумя операциями определяются основные метрологические характеристики существующих м.в.а.: разрешающее время, изменение погрешности измерений по диапазону, стабильность и линейность временной шкалы, динамический диапазон измерений и диапазон допустимых входных статистических нагрузок.

Более конкретно задачи настоящей работы включали следующее:

1. Теоретический анализ методов первичной обработки потоков стохастических сигналов на входе м.в.а. и обоснование метода, допускающего минимальные искажения статистических временных распределений при больших средне-статистических нагрузках и наличии высокоинтенсивного шума.

2. Реализация предложенного метода первичной обработки потоков сигналов на входе м.в.а. Анализ погрешностей метода на основе полученных экспериментальных данных.

3. Исследование и сравнение новых вариантов верньерного метода измерения временных интервалов, использующих полное и частичное совмещение электрических цепей рециркуляционных генераторов. Разработка прецизионного верньерного время-импульсного преобразователя для диапазона $10^{-11} \div 10^{-6}$ сек.

4. Исследование метода преобразования ВАК, разработка прецизионного преобразователя ВАК и анализ его характеристик на основе полученных экспериментальных данных. Сравнение возможностей метода ВАК и верньерного метода.

5. Разработка и реализация прецизионного 1024-канального временного анализатора, являющегося практическим воплощением результатов исследований по п.1 ÷ 4. Оценка основных характеристик анализатора в реальных экспериментальных условиях.

В главе I рассмотрены методы обработки потоков стохастических сигналов на входе м.в.а. В частности, проведен анализ погрешностей существующей методики первичной обработки потоков случайных сигналов, дано обоснование предложенного эффективного способа первичной обработки и его конкретная реализация во входном блоке м.в.а.

В современных м.в.а. перед измерительным контуром, преобразующим временные интервалы в цифровой код, как правило, устанавливается устройство, осуществляющее первичную обработку входных сигналов. При помощи данного устройства из входных потоков сигналов по определенным признакам выделяются импульсы, задающие начало и конец измеряемых временных интервалов, выполняется временная привязка к этим импульсам, а также регулируется скорость их поступления на вход преобразователя.

Упомянутые операции вносят ощутимый вклад в общие искажения регистрируемых распределений временных интервалов. В настоящее время разработаны эффективные практические методы, позволяющие свести к минимуму потери по разрешающей способности в процессе предварительной обработки входных сигналов м.в.а. Достигнуты также определенные успехи в исследовании и устранении причин, вызывающих искажение регистрируемых распределений временных интервалов в м.в.а. Однако, этот вопрос требует более детального рассмотрения.

На сегодняшний день практически не исследован вопрос об искажениях регистрируемых распределений временных интервалов, возникающих из-за наличия во входных потоках случайных сигналов генетически не связанных помеховых импульсов. В работе проведен анализ искажений подобного рода для случая радиоактивного распада. Истинная форма кривой радиоактивного распада $\varphi(t)$ и измеренное временное распределение $W(t)$ связаны соотношением:

$$\varphi(t) = \frac{1+\mu}{\alpha\mu} e^{\theta t} \left\{ W(t) - \theta \left[1 - \int_0^t W(\tau) d\tau \right] \right\} \quad (1)$$

где $\theta = (\ln + \alpha L_c)$ - плотность суммарного потока;

α - вероятность регистрации событий в старт- и стоп-канале;

L_n - плотность потока помеховых импульсов в старт- и стоп-канале;

L_c - плотность первоначального сигнального потока;

$\mu = \frac{\alpha L_c}{L_n}$ - отношение сигнал/шум;

τ - время, через которое возникает сигнальный импульс в стоп-канале после того, как произошла привязка к сигнальному импульсу в старт-канале;

$\varphi(\tau)$ - распределение временных интервалов τ .

На основании выражения (I) можно заключить, что с изменением плотности суммарного потока (θ) и номера канала (t) изменяются поправки, необходимые для восстановления истинной формы кривой распада по измеренному временному распределению. Это объясняется тем, что при существующей методике первичной обработки входных потоков случайных сигналов любая пара импульсов, действующая на входе анализатора, в момент окончания цикла регистрации незамедлительно принимается в измерительный контур. Поэтому с увеличением плотности потоков входных сигналов увеличивается вероятность регистрации ложных событий в младших каналах и увеличивается вероятность перекрытия старших каналов из-за "мертвого" времени, связанного с регистрацией ложных событий в младших каналах анализатора. Следовательно, существующая методика первичной обработки входных потоков случайных сигналов имеет существенный недостаток, приводящий к искажению регистрируемых статистических распределений временных интервалов.

При такой методике восстановления истинного распределения по приборному необходима машинная обработка результатов измерений.

Предлагаемый метод первичной обработки потоков случайных сигналов отличается от рассмотренного тем, что на входе м.в.а. установлено специальное устройство, которое контролирует число случайных импульсов в измеряемом диапазоне n , если это число превышает I , вырабатывается сигнал, запрещающий регистрацию текущего значения временного интервала в запоминающем устройстве м.в.а. В этом случае для потоков малой интенсивности истинное распределение с аппаратурным связаны соотношением:

$$\varphi(t) = \frac{f_1 \cdot P e^{f_2 T}}{f_0} \left[W^*(t) - \frac{(e^{-f_2 T} - P) f_2}{(1 - f_2 T) P} \right] \quad (2)$$

где $f_1 = L_n \cdot \alpha_1 L_c$; $f_2 = L_n + \alpha_2 L_c$

$f_0 = \alpha_1 \alpha_2 L_c$; $t < T$

α_1 - вероятность регистрации в старт-канале;

α_2 - вероятность регистрации в стоп-канале;

$P = \int_0^T W^*(t) dt$ - вероятность того, что в интервале $(0, T)$ в стоп-канале будет ровно один импульс после привязки в старт-канале к какому-либо импульсу при наличии запретов преобразования по числу стоп-импульсов в измеряемом диапазоне $> I$.

Величина $\frac{f_1 P e^{f_2 T}}{f_0}$ не зависит от времени (номера канала) и поэтому не она определяет искажения измеряемых распределений временных интервалов, т.е. является для нас несущественной. Величина "полки" под основным спектром, образованная за счет случайных отсчетов в каналах, определяется выражением

$$\frac{(e^{-f_2 T} - P) f_2}{(1 - f_2 T) P}$$

Следует отметить, что формулой (2) для устранения полки можно пользоваться лишь тогда, когда $f_2 T \ll 1$, так как, во-первых, эта формула не верна при $f_2 T = 1$, а, во-вторых, если $f_2 T$ близко к единице, то точность определения "полки" низка.

Если поток в стоп-канале малой интенсивности, то есть $f_2 T \ll 1$, то при большом числе испытаний $P = \frac{\bar{N}}{\bar{N} + n_0}$, где \bar{N} - число испытаний, когда в стоп-канале на интервале (0, T) был ровно один импульс, а n_0 - число испытаний, когда на этом интервале не было ни одного импульса.

В дискретном виде выражение (2) имеет вид;

$$\varphi_i = n_i - \frac{[(\bar{N} + n_0) e^{-f_2 T} - \bar{N}] f_2}{1 - f_2 T} \Delta t_i \quad (3)$$

где n_i - число импульсов, зарегистрированных в i -ом канале м.в.а;

Δt_i - ширина канала;

φ_i - истинное число отсчетов в i -ом канале, которое нас интересует.

При больших средне-статистических нагрузках, когда на интервале (0, T) среднее число импульсов ≥ 2 , связь между $\varphi(t)$ и $W^*(t)$ имеет вид:

$$\varphi(t) = \frac{f_1}{f_0} [1 - P_0 e^{f_2 T} (1 - f_2 T)] [W^*(t) - \frac{f_2 P_0 e^{f_2 T}}{1 - (1 - f_2 T) P_0 e^{f_2 T}}] \quad (4)$$

где $P_0 = \frac{e^{-f_2 T} [f_1 - f_0 \int_0^T \varphi(\tau) d\tau]}{f_1}$

При большом числе испытаний в случае высокоинтенсивного потока $P \approx \frac{n_0}{\bar{N} + \bar{N} + n_0}$,

где \bar{N} - число "запретов" преобразования (число случаев, когда на интервале (0, T) имеется два и более стоп-импульсов). В дискретном виде формула (4) записывается следующим образом:

$$\varphi_i = n_i - \frac{n_0 \bar{N} e^{f_2 T} f_2}{(n_0 + \bar{N} + \bar{N}) - n_0 (1 - f_2 T) e^{f_2 T}} \Delta t_i \quad (5)$$

Таким образом, для определения "полки" в случае малой интенсивности потока необходимо знать величины \bar{N} и n_0 , а в общем случае с произвольной интенсивностью потока требуется еще значение величины \bar{N} .

Следует отметить еще одно очень важное обстоятельство. Как показывают выражения (3) и (5), при предложенном способе первичной обработки потоков входных сигналов м.в.а., образованная под основным спектром за счет случайных отсчетов "полка" - это всего лишь равномерный подъем базовой линии прибора, который не может исказить истинный вид измеряемого закона распада.

Предложенный способ первичной обработки потоков случайных сигналов реализован во входном блоке м.в.а. Устройство включает три функциональных узла: схему формирования и селекции входных сигналов в старт-канале; схему формирования и селекции входных сигналов в стоп-канале и схему предварительного анализа входных потоков.

Рассматриваемое устройство обеспечивает усиление, стандартизацию и выделение полезной информации из входных потоков слу-

чайных сигналов с последующим отбором только тех событий, которые нужны для дальнейшего анализа. Цепи усиления и стандартизации включают широкополосные импульсные усилители и формирователи, которые разрабатывались на средне-статистическую импульсную нагрузку, равную $5 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$.

Регулирование скорости поступления сигналов на вход преобразователя обеспечивается двухступенчатой схемой селекции, управляемой регистрирующим устройством м.в.а. Двухступенчатая схема селекции позволила значительно ослабить воздействие переходных процессов элементов отбора сигналов на линейность коэффициента преобразования, т.к. она обеспечивает практически постоянный сдвиг фаз между импульсами, открывающими элементы отбора, и импульсами, определяющими начало и конец измеряемого временного интервала в преобразователе время-цифра.

В главе 2 рассматривается верньерный метод преобразования, который по мнению большинства специалистов, работающих над созданием новых средств измерения временных интервалов, является одним из наиболее перспективных. С ним обычно связывают большие надежды на существенное повышение линейности шкалы время-измерительных устройств нсек и псек диапазонов. Однако, имеющиеся потенциальные возможности метода по ряду трудно устранимых причин остаются до сих пор практически нереализованными, а отдельные разработки верньерных преобразователей либо уступают по точности существующим приборам другого типа (например, преобразователям ВАК), либо при эквивалентной точности намного сложнее их в реализации. По-видимому, данные обстоятельства явились причиной

того, что среди серийно выпускаемых время-измерительных приборов как в нашей стране, так и за рубежом верньерные устройства встречаются редко. Существующие трудности, однако, несколько не ослабили интерес к верньерному методу, а достигнутые за последние годы результаты подтвердили обоснованность возлагаемых на него надежд. Следует также отметить, что совершенствование верньерного метода временного анализа несомненно повлечет за собой дальнейшее развитие перспективных комбинированных методов преобразования время-код.

В процессе поиска новых путей повышения точности верньерных устройств возникла идея о формировании обеих серий импульсов, выполняющих преобразование время-цифра, не в двух, а в одном электрическом контуре с задержанной обратной связью (р.г.) [5]. В этом случае существенно ослабляется воздействие медленных дрейфов частоты р.г., определяющих в основном спектральную плотность мощности частотных флуктуаций, на стабильность ширины каналов, т.е. появляется возможность относительно простым способом улучшить основные метрологические характеристики верньерных устройств. При такой реализации верньерного время-импульсного метода преобразования для получения N уровней квантования на временном интервале, равном периоду р.г., и временной неопределенности в конце измеряемого динамического диапазона в один канал, необходимо иметь относительную нестабильность частоты р.г. равную $\frac{1}{N}$ в отличие от $\frac{1}{2N^2}$ для классической схемы верньерных преобразователей на двух р.г. С другой стороны, при заданной стабильности частоты р.г. верньерные преобразователи на одном р.г. по сравнению с обычными устройствами обеспечивают выигрыш по разрешающей

способности и динамическому диапазону измерений.

Предложенная модификация верньерного метода измерения временных интервалов была реализована в новых время-импульсных преобразователях. Экспериментально исследовались два возможных варианта преобразователей: с полным и частичным совмещением электрических цепей рециркуляции верньерных серий импульсов. При этом рассматривались также различные способы формирования и регулирования разности периодов обеих серий импульсов, т.е. шага квантования измеряемых временных интервалов.

На основании проведенных исследований было установлено, что верньерные преобразователи с полным совмещением цепей р.г. можно использовать для измерений во временном диапазоне 10^{-11} до 10^{-6} сек. Нижняя граница диапазона ограничена разрешающим временем преобразователя. Верхняя граница диапазона в реальных условиях не может существенно превышать 1 мксек из-за наличия затухания в радиочастотном кабеле и больших геометрических размеров последнего.

Основным достоинством этих устройств являются высокая разрешающая способность и стабильность шага квантования временных интервалов. Разрешающее время на основном участке измеряемого диапазона составляет 10^{-11} сек, а в конце диапазона не превышает $2 \div 3 \cdot 10^{-11}$ сек. При термостатировании схемы р.г. относительная суточная среднеквадратичная нестабильность шага квантования не превышает 0,01%.

К существенному недостатку устройства можно отнести сравнительно высокую нелинейность временной шкалы: при шаге квантования временных интервалов в 1 нсек и динамическом диапазоне измерений 1:1000 дифференциальная нелинейность временной шкалы состав-

ляет $6 \div 8\%$. Значительные неоднородности временной шкалы обуславливаются переходными процессами при формировании импульсов в следующих блоках преобразователя: в элементах схемы р.г., в схеме, задающей шаг квантования временных интервалов, а также в цепях селекции верньерных серий на входе схемы совпадения. В разработанных верньерных преобразователях приняты специальные меры для уменьшения аппаратных погрешностей, обусловленных каждым из перечисленных источников.

Паразитные колебания, вызванные переходными процессами в элементах схемы р.г. при формировании импульсов, производят модуляцию шага квантования временных интервалов. Чтобы уменьшить такого рода искажения однородности временной шкалы, минимально возможный интервал между импульсами обеих серий, генерируемых р.г., выбран достаточно большим: $\tau_0 = 600$ нсек. Однако, и эта мера не позволяет в должной степени ослабить влияние данного источника искажений однородности временной шкалы устройства. Следует также отметить, что увеличение минимально возможного временного интервала между импульсами обеих серий р.г. на величину, большую 600 нсек не дает дополнительного выигрыша в линейности временной шкалы, так как в этом случае для сохранения начального динамического диапазона измерений приходится выбирать радиочастотный кабель большей длины. Использование же в р.г. более длинного кабеля приводит к большему ослаблению основного сигнала в цепи задержанной обратной связи и к потере крутизны его фронта, что в свою очередь затрудняет достижение высокой линейности временной шкалы, несмотря на малую амплитуду паразитных колебаний.

Влияние автоколебаний в схеме, задающей шаг квантования временных интервалов, и в цепях селекции сигналов схемы совпадений

на линейность временной шкалы устройства уменьшается посредством тщательно выполненного монтажа и применением быстродействующих двухсторонних ограничителей, выполненных на высокочастотных диодах КД509А.

Рассмотренные источники неоднородностей временной шкалы преобразователя при регистрации равновероятностных временных интервалов ("белого" спектра) приводят к появлению в измеренном распределении "бугров" и "впадин". Аналогичные по характеру искажения равновероятностного временного распределения имеют место из-за наличия вентильных элементов во входных цепях схемы задержанных совпадений.

В отличие от неоднородностей временной шкалы, вызывающих появление "бугров" и "впадин" в измеренном распределении при регистрации равновероятностного распределения временных интервалов, дефекты временной характеристики схемы совпадений приводят к раздвоению аппаратурной линии. Устранение в верньерном преобразователе такого рода неоднородностей временной шкалы является сложной, но, по-видимому, технически решаемой задачей.

Таким образом, разработанный верньерный время-импульсный преобразователь, использующий один р.г. для генерирования обеих верньерных серий импульсов, обладает высокой разрешающей способностью, стабильностью шага квантования временных интервалов и широким динамическим диапазоном измерений. Однако, для данного класса верньерных преобразователей относительно сложно получить высокую линейность коэффициента преобразования.

Верньерные устройства на одном р.г. показали, что по сравнению с устройствами, использующими классическую схему на двух

р.г., они обладают существенно большей разрешающей способностью и стабильностью параметров временной шкалы. Однако, в случае верньерных устройств на одном р.г. значительно усложняется борьба со взаимными влияниями обеих серий импульсов. Помимо этих двух способов реализации верньерного метода временного анализа нами был исследован третий, занимающий промежуточное положение между первым и вторым и заключающийся в частичном совмещении цепей р.г.

При переходе от полного к частичному совмещению цепей р.г. достигается определенный выигрыш в линейности временной шкалы преобразователя, но неизбежны потери в разрешающей способности и стабильности параметров временной шкалы. Однако, эти потери могут быть незначительными, если общими для р.г. сделать элементы, обладающие наибольшей температурной и временной нестабильностью, в частности, общим в р.г. должен быть радиочастотный кабель задержки.

В разработанном преобразователе с частичным совмещением цепей р.г. для выбора необходимой разности периодов ΔT серий импульсов не требуются специальные схемы, управляемые внешним импульсным сигналом, как это имело место в преобразователе на одном р.г. с полным совмещением цепей генерируемых серий. Величина ΔT в данном устройстве задается пороговыми напряжениями используемых в р.г. формирователей импульсов: эти напряжения выбираются при начальной регулировке схемы и сохраняются постоянными в процессе измерений. Следовательно, в данном преобразователе устранен один из основных источников нелинейности временной шкалы, имеющийся в преобразователе на одном р.г. с полным совмещением цепей генерируемых серий. Кроме того, улучшение линей-

ности временной шкалы достигается также за счет того, что на входе схемы задержанных совпадений не нужно устанавливать вентиляционные элементы для выделения серий импульсов из последовательности сигналов, вырабатываемых р.г., так как смежные импульсы имеют различную полярность.

Экспериментальный анализ показал, что верньерные преобразователи с частично совмещенными цепями р.г. целесообразно использовать для измерений в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-6} сек. От начала измеряемого диапазона к его концу разрешающее время преобразователя изменяется от 10^{-10} сек. до $3 \cdot 10^{-10}$ сек. Термостатирование схемы р.г. при вынесении за пределы термостата радиочастотном кабеле задержки позволило получить относительно суточную нестабильность шага квантования с номинальной 10^{-10} сек, не превышающую 0,06%. Дифференциальная нелинейность временной шкалы преобразователя при цене канала 1 нсек и диапазоне измерений 1 нсек + 1 мксек составляла 3+4%.

Сопоставление этого результата с полученным для верньерного преобразователя на одном р.г. с полным совмещением электрических цепей генерируемых серий позволяет сделать вывод, что разделение цепей рециркуляционных генераторов в верньерном устройстве, без сомнения, способствует достижению лучшей линейности коэффициента преобразования. В целом, однако, следует отметить, что наличие у двух р.г. хотя бы одного общего элемента (например, коаксиальной линии задержки) существенно усложняет проблему устранения взаимных влияний одной серии импульсов на другую, вызывающих нарушения однородности временной шкалы преобразователя. Это подтверждается оценкой вклада различных факторов в общую нелинейность временной шкалы верньерного преобразователя с частично

совмещенными цепями р.г., которая позволяет сделать вывод, что приблизительно 60% полученного для устройства значения дифференциальной нелинейности обусловлено взаимными влияниями серий импульсов, генерируемых р.г., а оставшиеся 40% - дефектами временной характеристики схемы совпадений.

В главе 3 исследуется широко распространенный метод преобразования время-амплитуда-код. При помощи преобразователей, построенных на основе этого метода, относительно просто получить высокое разрешающее время (10^{-11} сек., 10^{-12} сек.) и дифференциальную нелинейность временной шкалы в динамическом диапазоне 1:256 при цене канала 0,5 + 1 нсек, равную ~ 2+5%. Практически получаемые результаты для метода ВАК, как целого, можно улучшить прежде всего за счет совершенствования преобразователей $t \rightarrow A$ и аналог-код.

Нелинейности преобразования $t \rightarrow A$, обусловленные конечным входным сопротивлением буферного каскада, конечной длительностью фронта старт- и стоп-импульсов и переходными процессами в ключевых элементах, не носят принципиального характера и легко сводятся к минимуму, если схема преобразователя удовлетворяет следующим относительно простым требованиям. Входное сопротивление буферного каскада должно быть большим ~ 1 мгом при емкости накопительного конденсатора $100 \div 500$ пкф и верхней границе диапазона измерений 1 мксек. В ключевых элементах необходимо использовать диоды с малым временем восстановления обратного сопротивления, например, диоды КД509А, КД510А, КД512А. Минимальный анализируемый временной интервал должен отличаться от нуля, чтобы исключить из преобразования сильно нелинейный начальный участок пило-

образного напряжения на зарядовом конденсаторе.

Приобретенный нами опыт в разработке прецизионных преобразователей $t \rightarrow A$ [2,4] позволил определить, что нелинейные искажения временной шкалы данного типа устройств происходят в основном в схеме формирования и селекции входных сигналов, а также за счет "просачивания" в.ч. сигналов и сопутствующих им автоколебаний от быстродействующих формирующих элементов на накопительный конденсатор. Поскольку в схеме формирования и селекции сигналов существующих преобразователей используется, как правило, большое число формирователей в.ч. сигналов, борьба с помехами, когерентными относительно старт-импульсов (начала шкалы), является сравнительно трудной, но решаемой задачей.

Исследование основных факторов, влияющих на линейность шкалы преобразователей ВАК, практическая разработка прецизионного время-измерительного устройства и анализ его характеристик на основе экспериментальных данных позволили установить, что существующие преобразователи ВАК имеют неудовлетворительную линейность временной шкалы из-за несовершенства схемных решений и несовершенства технологии изготовления преобразователей. Поэтому можно утверждать, что метод ВАК имеет далеко не использованные возможности улучшения основных метрологических характеристик и, в частности, линейности коэффициента преобразования.

При разработке преобразователя большое внимание уделялось сложной проблеме получения высокой линейности коэффициента преобразования на начальном участке временной шкалы. Для обеспечения линейности коэффициента преобразования в младших каналах м.в.а. используются два приема. В конверторе $t \rightarrow A$ исключен из преобразования сильно нелинейный начальный участок пилообраз-

ного напряжения, для чего минимально возможное расстояние между его входными импульсами установлено равным 200 нсек. Выбор величины 200 нсек позволяет свести к минимуму нелинейности преобразования, связанные с конечным временем восстановления обратного сопротивления ключевого диода, конечным фронтом импульса запирающего, а также просачиванием на конденсатор автоколебаний, возникающих при переключении коммутирующего триггера. Кроме того, в конвертере аналог-код запрещается обработка сигналов, амплитуда которых сравнима с пороговым напряжением операционного усилителя. При отсутствии в преобразователе аналог-код упомянутого запрета временная шкала прибора имеет значительный и сильно нелинейный участок приблизительно в 200 каналов при общем числе 1024. Для устранения этого участка формируется импульс блокировки начального участка выходного цуга импульсов преобразователя аналог-код. Длительность импульса блокировки равна 10 мксек. Для стабилизации временного интервала 10 мксек схема задержки построена аналогично схеме $t \rightarrow A$ с использованием прецизионных элементов с минимальными временными и температурными дрейфами и прецизионных источников питания. Относительная величина дрейфов временной задержки в лабораторных условиях не превышает 0,1%, поэтому они не оказывают практически никакого влияния на общую стабильность параметров временной шкалы прибора. Блокировка начального участка рабочего диапазона преобразователя аналог-код не имеет принципиального значения для анализа малых временных интервалов, поскольку этот участок можно всегда выбрать установкой фиксированной задержки в стоп-канале на входе м.в.а. Для устранения эффекта раздвоения аппаратурной линии, кото-

рый имеет место при использовании в преобразователях аналог-код высокочастотных (≥ 10 МГц) опорных генераторов, к фазе опорного генератора привязывается не только начало разряда накопительного конденсатора, но и обрыв выходного цуга импульсов устройства.

Необходимым условием получения хороших метрологических характеристик, в том числе малой нелинейности коэффициента преобразования ВАК является правильный монтаж как отдельных элементов схемы, так и всего устройства в целом. Особенно важное значение имеет монтажная схема преобразователя $\epsilon \rightarrow A$, которая должна выполняться в строгом соответствии с существующими правилами монтажа высокочастотных схем. Рассматриваемый преобразователь $\epsilon \rightarrow A$ собран на плате из стеклотекстолита навесным монтажом на штырьках, а под платой размещается посеребренная медная пластина, к которой припаиваются все земляные точки схемы и нулевые выходы источников питания. Для ослабления возможных взаимных помех через источник питания все элементы схемы, в которых действуют импульсы малой длительности, имеют эффективные развязывающие цепи, включающие в себя безындукционные опорные конденсаторы, а для сильноточных высокочастотных элементов схемы применяются автономные источники питания.

Оценка основных метрологических характеристик преобразователя выполнялась экспериментальным путем. Разрешающее время преобразователя в начале и конце измеряемого диапазона определялось по ширине (на полувысоте) двух реперных линий, одна из которых размещается в начальных каналах, другая - в последних. По смещению положений реперных линий при эксплуатации прибора в лабо-

раторных условиях в течение 28 часов регистрировалась относительная нестабильность шага квантования измеряемых временных интервалов. Она не превышает 0,1%. Разрешающее время при цене канала 10^{-11} сек в конце измеряемого диапазона 10^{-10} сек. Для оценки дифференциальной нелинейности временной шкалы преобразователя записывался "белый" спектр: на старт- и стоп-выходы м.в.а. подавались пуассоновские потоки импульсов со среднестатистическими интенсивностями 10 Кгц и 50 Кгц. Зарегистрированное за 28 часов набора равновероятностное распределение временных интервалов позволило установить, что дифференциальная нелинейность на 90% временной шкалы при цене канала в 1 нсек равна $\sim \pm 0,6 \pm 0,8\%$ при среднеквадратическом наборе в каналах $42 \cdot 10^3$ отсчетов. Интегральная нелинейность равна $\sim 0,3\%$.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что устройство может эффективно использоваться в динамическом диапазоне измерений от 10^{-10} сек до 10^{-6} сек: оно обладает высокой разрешающей способностью, имеет достаточно хорошую стабильность параметров временной шкалы и, что наиболее ценно, относительно высокую линейность временной шкалы при широком диапазоне измерений. К важным достоинствам устройства следует отнести также высокое быстродействие, обусловленное использованием опорной серии импульсов 20 Мгц, и возможность получения в измеряемом диапазоне большого числа интервалов квантования.

В главе 4 описан разработанный многоканальный временной анализатор, в основу которого положены, обоснованные в предыдущих разделах работы, эффективный метод обработки случайных сигналов на входе анализатора и прецизионные методы преобразования време-

код. В комплект анализатора входят преобразователь ВАК (см.гл.3) и преобразователь верньерного типа с частичным совмещением цепей р.г. (см.гл.2). Анализатор предназначен для измерений временных интервалов в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-10}$ сек до 10^{-6} сек.

Основное внимание при выборе структурной схемы анализатора было уделено процессу автоматической регистрации информации, поступающей со входных преобразователей, в результате чего были выбраны два режима программы "анализ": старт-стопный и режим совмещенной работы регистрирующего устройства с входными преобразователями. Старт-стопный режим программы "анализ" позволяет работать только с одним из входных преобразователей. В этом случае обеспечивается последовательная работа входного преобразователя с регистрирующим устройством. Режим совмещенной работы предусматривает следующее: одновременную работу двух преобразователей с последовательным доступом в память каждого из них ($0 \div 512$ к; $513 \div 1023$ к) с регистрацией "живого" времени (ЖВ) одного из преобразователей и общего времени (ОВ) работы анализатора в "0"-ом и "1"-ом каналах соответственно; работу одного преобразователя с регистрацией ЖВ и ОВ; работу одного преобразователя без регистрации ЖВ и ОВ. В рассматриваемом режиме цикл регистрации совмещен с работой входного преобразователя, т.е. новое преобразование может начинаться сразу же после приема номера канала с преобразователя в адресный регистр регистрирующего устройства. Длительность цикла регистрации равна 18 мксек.

Блок управления выводом информации позволяет осуществить с помощью ленточного перфоратора документальную регистрацию информации в виде, удобном для ввода ее в вычислительную машину с

целью дальнейшей обработки. Предусмотрен также вывод на цифро-печатающее устройство "Консул-254". Скорость вывода информации на перфоратор равна 4 канал/сек., на "Консул-254" - 1 канал/сек. В аналоговой форме информация выводится на экран электроннолучевой трубки (ЭЛТ) и самопишущее устройство. В качестве самописца могут быть использованы как однозаписные перьевые самописцы (ЭПП-0,9; ПСМ-2), так и двухкоординатный самописец с записью на диаграммной бумаге (ЭП2К-01). Скорость вывода информации на самописец равна 4 канал/сек. Кроме того, предусмотрен вывод информации на цифровую индикацию непосредственно с экрана ЭЛТ с помощью светового карандаша.

В целом анализатор МВА-1024 показал высокую надежность в работе при длительной эксплуатации в лабораторных условиях.

В диссертации получены следующие основные результаты.

1. Исследованы основные принципы и характер искажений временной информации при различных способах первичной обработки потоков случайных сигналов на входе м.в.а. Для различных вариантов первичной обработки информации на входе м.в.а. определены аналитические выражения, связывающие аппаратные спектры с истинными распределениями временных интервалов.

2. Установлено, что значительные искажения временных спектров в м.в.а. всегда имеют место при наличии во входных потоках сигналов помимо истинных коррелированных событий высокоинтенсивных некоррелированных составляющих. При определенных условиях значительные искажения могут возникать из-за конечного "мертвого" времени системы регистрации м.в.а. и наличия схем временной селекции

которые устанавливаются на входе м.в.а. для ослабления интенсивности входных сигналов до уровня, соответствующего быстродействию измерительного контура прибора.

3. На основании теоретического анализа обоснован наилучший для типовых экспериментальных условий способ первичной обработки сигналов на входе м.в.а., обеспечивающий минимальные искажения измеряемых временных распределений при высокоинтенсивных входных нагрузках и наличии помеховых потоков импульсов на выходе.

4. Предложенный способ первичной обработки потоков случайных сигналов на входе м.в.а. реализован во входном блоке 1024-канального временного анализатора. Для борьбы с искажениями измеряемых распределений временных интервалов при первичной обработке входной информации используются: запрет преобразования по наличию двух и более стоп-сигналов в измеряемом диапазоне, двухступенчатая селекция входных сигналов и блокировка схем селекции на фиксированное время после каждого входного сигнала.

5. Исследован новый вариант верньерного импульсного метода измерения временных интервалов нсек и нсек диапазонов, использующий совмещение (полное и частичное) двух электрических цепей, генерирующих верньерные серии импульсов.

6. Установлено, что при полном совмещении электрических цепей р.г. верньерные устройства имеют наибольшую разрешающую способность - до $2 + 3 \cdot 10^{-11}$ сек. В этих приборах можно получить также наиболее широкий динамический диапазон с минимальным ухудшением разрешения и стабильности временной шкалы в конце диапазона: при интервале квантования 10^{-11} сек. разрешающее время

составляет $2 \cdot 10^{-11}$ сек в начале диапазона и $3 \cdot 10^{-10}$ сек. у верхней границы диапазона, равной 1 мсек, а суточная нестабильность шага квантования в лабораторных условиях не превышает 0,03%.

Основным недостатком этих приборов является значительная дифференциальная нелинейность временной шкалы, которая при цене канала в 1 нсек и динамическом диапазоне 1:1024 составляет $6 + 8\%$.

7. Сравнительная оценка устройств с полным и частичным совмещением цепей р.г. показала, что последние при эквивалентных условиях (п.6) обеспечивают лучшую линейность временной шкалы ($3 + 4\%$); однако, они существенно уступают первым по разрешающей способности и стабильности шага квантования: разрешающее время не превышает $0,3 + 0,4$ нсек, в начале диапазона 1:1000 (цена канала 0,2 нсек) и 2 нсек - в конце; суточная нестабильность шага квантования в лабораторных условиях 0,3%.

8. Разработан и реализован новый прецизионный преобразователь время-амплитуда-код. Динамический диапазон преобразования составляет 1:1024, разрешающее время при цене канала 10^{-11} сек на наихудшем участке временной шкалы, соответствующем концу измеряемого диапазона, составляет 10^{-10} сек. Дифференциальная и интегральная нелинейность временной шкалы при цене канала 1 нсек на 90% временной шкалы соответственно равны $\pm 0,6 + 0,8\%$ и $\pm 0,3\%$, а суточный дрейф цены канала в лабораторных условиях $\pm 0,1\%$. Динамический диапазон преобразования относительно просто расширить до величины 1:4096.

9. На основе новых разработок прецизионного верньерного преобразователя (п.7) и преобразователя время-амплитуда-код

(п.8) создан 1024-канальный временной анализатор с двумя диапазонами измерений: $0,5 + 500$ нсек и $1 + 1000$ нсек, предназначенный для использования в экспериментальной ядерной физике. Система регистрации анализатора выполнена на основе ферритового запоминающего устройства (ЗУ) с числом ячеек 1024 и емкостью каждой ячейки 10^5 . Она включает блок вывода данных из ЗУ на цифropечать, ленточный перфоратор и самописец, а также блок визуального контроля записанной в ЗУ информации, который включает электронный осциллограф, электромагнитное табло и электронный карандаш.

Основные материалы диссертации изложены в следующих работах:

1. К.Н.Бакиновский, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев "Современные направления развития методов многоканального временного анализа". Вестник БГУ им.В.И.Ленина, сер. I, № 1, 160, 1969г.
2. К.Н.Бакиновский, М.И.Демчук, С.Е.Лещенко, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев, "Широкодиапазонный время-амплитудный преобразователь", Вестник БГУ им.В.И.Ленина, сер. I, № 2, 61, 1969г.
3. К.Н.Бакиновский, И.А.Малевич, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев "Быстродействующий рециркуляционный генератор с малой относительной нестабильностью частоты", ПТЭ, № 6, 89, 1970г.
4. К.Н.Бакиновский, М.И.Демчук, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев "Широкодиапазонный преобразователь время-амплитуда". ПТЭ, № 3, 276, 1970г.
5. В.В.Грек, А.Н.Писаревский, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев "Многоканальный временной анализатор верньерного типа". ПТЭ, № 2, 283, 1971г.
6. К.Н.Бакиновский, В.В.Грек, И.А.Малевич, А.Ф.Чернявский, А.К.Якушев "Время-импульсный преобразователь на аналого-динамическом запоминающем устройстве", ПТЭ, № 2, 114, 1971г.
7. Г.И.Шпаковский, А.К.Якушев "Цифровой анализатор гармоник" Авторское свидетельство № 232600 класс 42М, Бюллетень изобретений, промышленных и товарных знаков, № 32, 1968г.