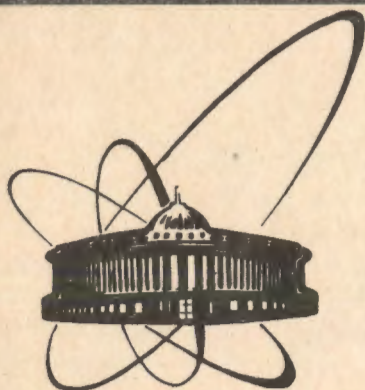


90-577



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-90-577

В. Н. Замрий

ОСОБЕННОСТИ БЫСТРОЙ
ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ФОРМЫ СИГНАЛОВ

•

1990

При исследовании однократных или редко повторяющихся быстропротекающих процессов приходится решать задачу регистрации формы сигналов. Она решается при помощи запоминающих цифровых осциллографов или цифровых регистраторов формы сигналов (ЦРФС) в сочетании с ЭВМ для автоматизации эксперимента^{1/1}. Для задач быстрой регистрации формы коротких импульсов $\sim 10-100$ нс^{1/2} разработка прецизионного ЦРФС остается технически трудно реализуемой. Особенности такой регистрации определяют требования к метрологическому обеспечению (МО), включающему аппаратуру и алгоритмы измерения и проверки, а также соответствующие методы и нормативы, с учетом возрастающей стоимости системы МО ЦРФС^{1/3}.

Обычно нормируемая полоса пропускания или переходная характеристика входной аналоговой схемы наряду с погрешностью квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для случая сигналов стандартной формы дают некоторые оценки точности регистрации (в памяти ЦРФС), а также достаточной частоты выборки или дискретизации формы. Более специфичным является учет динамических погрешностей выборки мгновенной величины сигнала и истинного момента выборки при измерениях формы или заданного параметра сигнала (его величины в заданный момент времени, времени достижения заданной величины и т.д.). Требования к МО динамических измерений существенно различаются для ряда решаемых задач — от регистрации совокупности мгновенных значений сигнала в заданные моменты времени (РЭС) до регистрации формы сигнала (РФС).

Так, регистрируемую форму $Y(t)$ определяют через измеренные амплитудно-временные соотношения при допустимых изменениях смещений и масштабов сигнала $X(t)$; и погрешность РФС, характеризующую текущей ошибкой $e(t) = C + A \cdot X(B \cdot t + D) - Y(t)$, минимизируют подбором коэффициентов C и A или D и B соответственно смещения и масштаба амплитуды или времени. Аналогичным подбором компенсируются аддитивные и мультипликативные составляющие погрешности от восстанавливающего устройства (ЦАП, интерполятор в ЭВМ). Выбор таких коэффициентов иной при определении погрешности РЭС (фиксируются значения $A, B = 1, C = D = 0$) и ряда промежуточных задач, например, получение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по искажению синусоидального сигнала ($A, B = 1$, подбор C и D по минимуму погрешности) или фазочастотной характеристики ($B = 1, D = 0$, подбор C и A).

Основная погрешность РЗС в статике $e_i = X_i - x_i \cdot k$, где X_i — измеряемая величина, x_i — измеренное значение и k — величина квантования, дополняется в динамике неопределенностью момента выборки i , искажениями аналогового сигнала, профилей квантов в АЦП и др. Соотношения погрешностей РЗС и РФС в каждой точке $e(t)$ зависят от мгновенных значений производных сигнала, не являясь простыми комбинациями всех учитываемых составляющих. Актуальные при РЗС проблемы обеспечения точности датирования измерения (учета погрешности момента выборки и работы АЦП) сводятся при РФС к обеспечению синхронизации с сигналом и равномерности повторения выборки.

Нормируемые метрологические характеристики: задержка измерения (не влияет на погрешность РФС), апертурное время (требуется учет производной сигнала), неравномерность АЧХ (применима для синусоидального сигнала) и погрешность АЦП в динамическом режиме для сигнала регламентированного вида. Ошибка первой характеристики существенно маскирует ошибки других характеристик при РЗС. Первые три характеристики позволяют сравнивать различные ЦРФС в конкретных задачах. Последняя характеристика более соответствует основной задаче МО РФС — достижение единства и точности результата. Эти частные характеристики дополняют динамические нелинейности и другие погрешности из-за переходных процессов. При определении и учете таких составляющих возможные накопления и трансформации ошибок затрудняют точную оценку результата. Методы определения погрешности на основе динамических параметров АЦП; первой производной и граничной частоты спектра сигнала более ориентированы на конкретные задачи РЗС. При другом подходе регистрируемая функция совмещается с синусоидой подбором коэффициентов и определяется зависимостью ошибки $e(t)$ от частоты сигнала. Практически более доступными становятся решения задач с достаточно быстродействующими АЦП, для которых динамические погрешности в достаточной мере не существенны или учитываются при регистрации регламентированной формы сигналов.

Реальные характеристики ЦРФС и технические решения на современном уровне определяются доступностью, возможностью применения в системе МО динамических измерений больших интегральных схем, БИС быстрых АЦП, схем выборки и хранения (СВХ) и других, с определенными (изготовителем) метрологическими характеристиками. С учетом требований МО ЦРФС и предельных значений параметров доступных БИС элементной базы разработаны модули программно-управляемых прецизионных регистраторов для применения в составе измерительных систем КАМАК⁴. На задачи РЗС более ориентирован вариант, выполненный на основе гибридных БИС СВХ с временем выборки 200 нс (установление сигнала 10 В с точностью 0,01-0,1% за 100-200 нс, задерж-

ка 20 нс, погрешности хранения 0,01 мВ/мкс и апертурности 2,5-10 мВ при полосе до 0,5-5 МГц) и 12-разрядного АЦП с временем преобразования 2,8 мкс при величине и погрешности квантования 2,5 мВ и 0,01% с учетом нелинейности, причем, применение СВХ позволило в ~ 10 раз уменьшить время выборки и динамические погрешности АЦП. Такие параметры, а также программируемый выбор длительности и числа циклов регистрации ($T \geq 5 \div 40$ мкс и $M = 1 \div 255$), режимов внутренней и внешней синхронизации, однократного и периодического запуска регистрации, обеспечили решение задачи мультимплексированного измерения амплитудных и временных параметров группы сигналов⁵. Вариант ЦРФС построен с применением менее дорогих полупроводниковых БИС СВХ и АЦП (время выборки 3 мкс при погрешности ~ 0,1%, нарастания ~ 0,1 мкс и апертурности 50 нс, полоса 2 МГц, преобразование в 8-разрядный код ~ 5 мкс, величина и погрешности квантования 40 мВ и 0,4%). ЦРФС с программируемым выбором режимов синхронизации и запуска как регистрации ($M = 1 \div 1023$, $T \geq 10 \div 80$ мкс), так и вывода данных, а в промежутках — индикации зарегистрированной формы (на выходе ЦАП), используется в составе системы контроля импульсной магнитной установки⁶ с целью фиксации формы и амплитуды разрядных сигналов. Первый образец быстрого ЦРФС, разработанного на основе сверхбыстрых БИС 6-разрядного АЦП и памяти, с длительностью 64 циклов регистрации 2,1 мкс и программируемой задержкой 0 ÷ 2,1 мкс, испытан в составе многоканальной системы диагностики формы импульса тока (заряда) пучка ускорителя⁷ и затем заменен на еще более быстрый. На этом этапе определены ограничения при минимизации установленного цикла (33 нс), необходимость обеспечения достаточной стабильности задержек и длительности импульсов в схеме синхронизации и управления (СИУ), построенной ранее с использованием аналоговых задержек соединений логических элементов ЭСЛ, интеграторов и одновибраторов, целесообразность совмещения записи в память ОЗУ (до 15 нс) с преобразованием в АЦП (до 20 нс) и адресацией в счетчике (частота обратного счета 50-100 МГц, задержка 5-10 нс), а также введения поверочного режима внешней синхронизации (стабильного кварцевого генератора).

Модуль сверхбыстрого ЦРФС с интерфейсом магистрали КАМАК, созданный с учетом опыта предшествующих разработок цифровых регистраторов, представлен на рис.1, где обозначены: 1 и 7 — входы аналогового сигнала, запуска и синхронизации, 2 — входная аналоговая схема, 3 — регулируемые источники опорного напряжения, 4 — сверхбыстрый АЦП, 5 — буферный регистр, 6 — сверхбыстрая память, 8 — схема дискретных задержек СИУ, 9 и 11 — трансляторы сигналов логики ТТЛ-ЭСЛ и ЭСЛ-ТТЛ, 10 — синхронный счетчик адреса, 12 — регистр

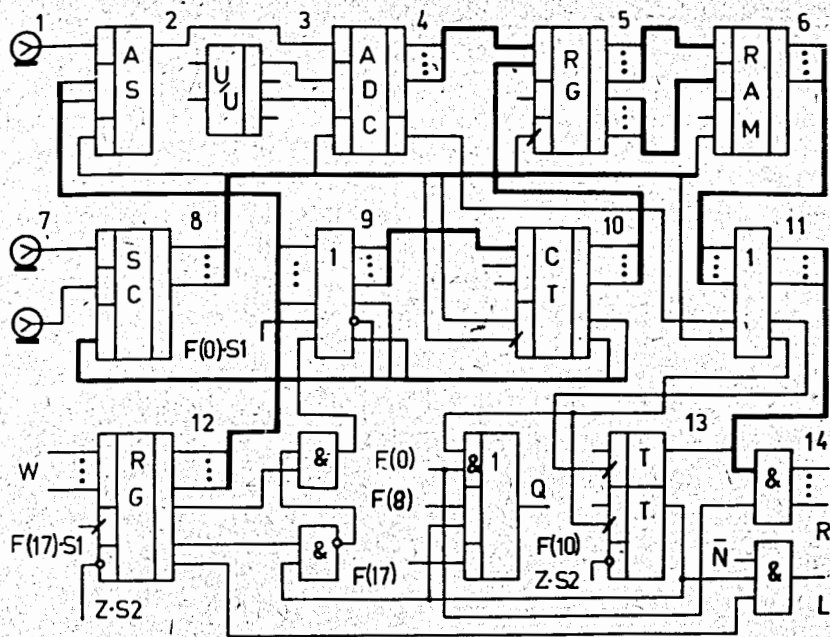


Рис.1

кода статуса, 13 — триггеры сигналов переполнения АЦП и запроса L, 14 — элементы стробирования кода данных. Схема 2 обеспечивает переключаемое деление или усиление сигнала, а также согласование с сопротивлением и емкостью входа АЦП; 3 — подстройку заданного диапазона $0 \div 2$ В и характеристики гистерезиса параллельного АЦП; 8 — синхронизацию (после разрешенного запуска, тактами внешнего или внутреннего генератора стабильной частоты) дискретных задержек и длительности формируемых импульсов для выборки и преобразования аналогового сигнала, установки и отсчета адреса, буферизации и запоминания данных с целью последующего чтения, а регистр 5 с задержкой ~ 3 нс при приеме и съеме информации — гарантированный минимально необходимый интервал запоминания (при совмещении с временем преобразования и отсчета). Схема 3 выполнена на основе ИС стабилизатора напряжения К142ЕН1 (МАН723), 4 — БИС параллельного АЦП 1107ПВ3А (Б), 5, 6, 9, 10 и 11 — соответственно 3 ИС синхронного 4-разрядного регистра 500ИР141, 6 ИС оперативной памяти (64 слова \times 1 разряд) 500РУ148, 2 ИС 4-входового транслятора 500ПУ124, 2 ИС универсального 4-разрядного счетчика 500ИЕ136 и 2 ИС 4-входового транслятора 500ПУ125, 12, 13 и 14 — соответственно 3 ИС 4-разрядного ре-

гистра К155ТМ8, ИС 2 триггера К155ТМ2 и 2 ИС 4 логических элемента К155ЛА8. Особенности схем 2 и 8, влияющие на метрологические характеристики ЦФС, рассматриваются далее более подробно.

Команды КАМАК интерфейса N·A(0)·F:

- F(17) — запись кода статуса W, ответ $Q = 1$;
- F(10) — сброс триггеров запроса L и переполнения, $Q = 0$;
- F(8) — проверка наличия запроса, $Q = L$;
- F(0) — чтение данных R, изменение адреса, $Q = 1$ в режиме вывода.
- Z — сброс регистра статуса и триггеров.

Значения разрядов статуса $W1 \div W12$: запрос L разрешен/не разрешен, LE/LE; старт разрешен/не разрешен, SE/SE; разрешена синхронизация от генератора внешнего/внутреннего, GE/GE; разрешен старт однократный, при $L = 0$ / периодический, SL/SL; усилитель включен/не включен, AE/AE; делитель выключен/не выключен, KE/KE; и 6 разрядов кода задержки, $M = 0 \div 63$.

В универсальном счетчике 10, по сигналу разрешения на его управляющем входе и синхриимпульсам осуществляется параллельное занесение кода числа M и двух старших разрядов (P8, P7), а затем обратный счет. Код этих разрядов определяет чередование основных режимов ЦФС; 10 — исходное состояние, разрешенный запуск и установка вычитаемого числа (P8 P7 M), 01 — отсчет M + 1 циклов задержки, 00 — выполнение 64 циклов регистрации данных, 11 — вывод данных по сигналам команд F(0)·S1.

Схема дискретной синхронизации и управления показана на рис.2, где 1 и 7 — входы сигналов уровня НИМ для запуска и внешней синхронизации, 2, 5 и 8 — элементы разрешения запуска, генератора тактов синхронизации и формирования, ИС 4 логических элемента, 500ЛМ102; 3, 4, 9 и 10 — триггеры сдвиговых регистров запуска (T1 ÷ T4) и управления запоминанием (T6 ÷ T8), делителя частоты T5, ИС 2 синхронных триггера, 500ТМ131; 6 и 11 — схемы формирования, ИС 3 и 4 элемента с общим сходом, 500ЛМ105 и 500ЛМ101; 12, 13 и 14 — сигналы разрешения вывода, занесения и запоминания; 15, 16, 17 и 18 — синхриимпульсы для буферного регистра, адресного счетчика, АЦП, выборки.

Режимы и последовательности сигналов СИУ иллюстрируют временные диаграммы, рис.3, где 1 — запуск, 2 — установка триггера T1, 3 — разрешение занесения (сигнал T1, плюс задержка элемента $t_3 = 2$ нс), 4 — такты синхронизации (период $T = 10$ нс), 5, 6 и 7 — сигналы T2, T3 и T4, 8 — синхриимпульсы счетчика (сигналы T3 и T5, с задержкой $+t_3$ и $2t_3$), 9 и 15 — разряды счетчика P8 и P7, 10 — синхриимпульсы выборки и преобразования (сигнал T5, $+t_3$ и $+2t_3$), 11, 12 и 13 — сигналы T6, T7 и T8, 14 — разрешение запоминания, 16 — разрешение вывода, 17 — импульсы команд чтения F(0)·S1. С установкой 2 начинается (при

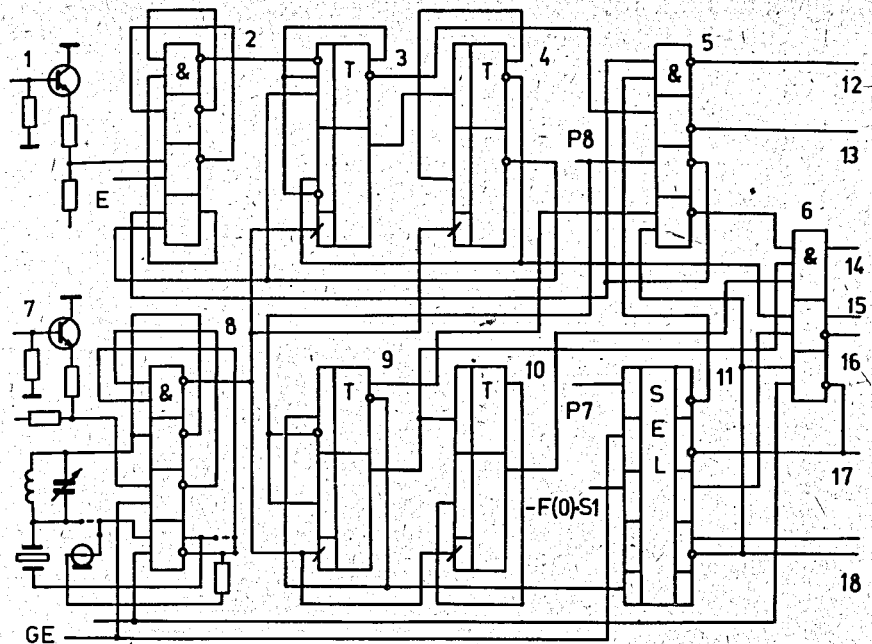


Рис.2

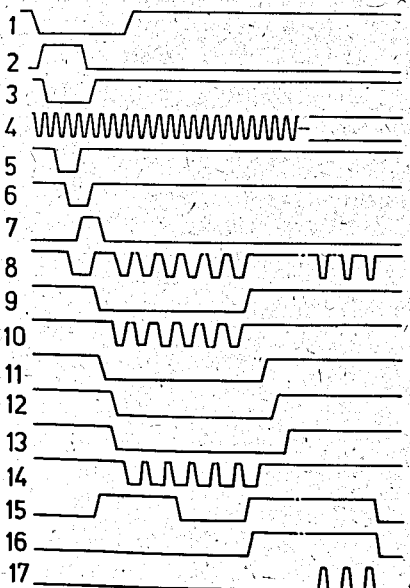


Рис.3

разрешающем сигнале $E = SE \cdot SL \cdot L$) формирование разрешения 3 и через время $\sim 2T$ импульса занесения (6, 8), а еще через T — блокировки (7) для сигнала 2. После окончания импульса 6 длительностью $2T$ и установки 9, 15 продолжается блокировка сигнала 2, следуют с задержкой $2T$ синхроимпульсы 8, 10 и затем через T — разрешение запоминания 14, снимаемое на время ($\sim t_3$) изменения кода буферного регистра. За отсчетом времени задержки $2T(M+1)$ и переключением 15 следует заполнение памяти в течение времени $128T$, затем разрешение вывода 16, а через $2T$ снимается сигнал 11 и разрешение 14. Продолжительность последовательности СИУ — от $138T$ до $264T$ при неопределенности

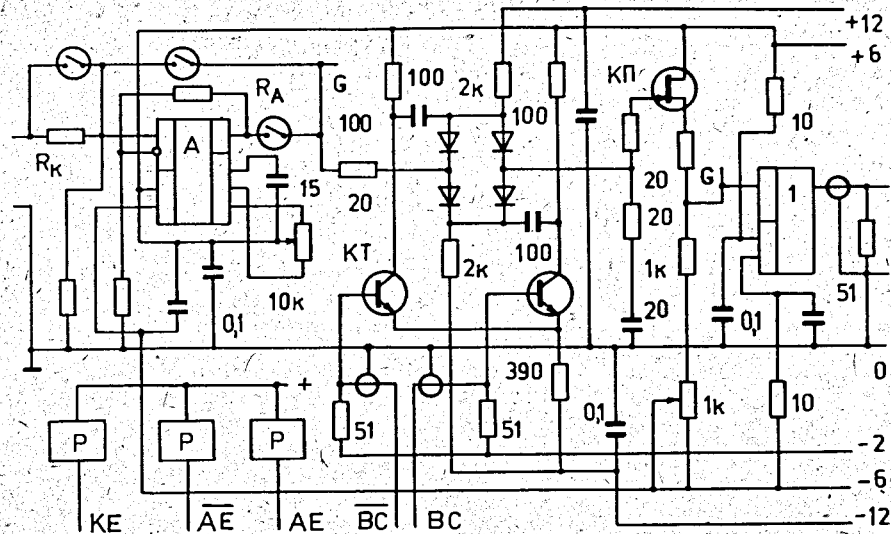


Рис.4

начала $\pm 0,5T$, и частота повторения запуска — от 0 до $0,37$ ($0,71$) МГц при $T = 10$ нс. Вывод данных по командам 17 (с ответом Q) завершается возвращением в исходное состояние 16. Последующее исполнение 64 команд чтения (без ответа Q) приводит к возобновлению последовательности тактов задержки, регистрации и затем разрешению вывода. Продолжение циклов чтения может использоваться для периодического повторения режимов. Величина и стабильность периода T для встроенного генератора заданы параметрами кабеля РК50-1-22' длиной ~ 50 см в цепи обратной связи либо подключаемого кварцевого резонатора РКМ-2 с частотой 50 МГц и контуром, подстраиваемым на частоту гармоники 100 МГц.

Аналоговая схема, рис.4, выполнена с использованием повторителя сигнала (ИС типа LH 0002, NSC), обеспечивающего фронт (время установления) ~ 10 (25) нс при коэффициенте передачи 0,93 на согласованный (50 Ом) кабель АЦП. К повторителю могут быть подключены входной делитель с коэффициентом 0,5 либо 1 при $R_K = 75$ (50) Ом и усилитель с коэффициентом 2 при $R_A = 2$ (1) кОм, а также встроенная СВХ. Коэффициент делителя, выходы делителя и усилителя переключаются магнитоуправляемыми контактами реле P (типа РЭВ 18А с полосой частот до 100 МГц) по сигналам статуса KE и AE либо AE. Схема на основе ИС операционного усилителя 154УД3 или AD509J (со скоростью нарастания ~ 100 В/мкс, полосой ~ 20 МГц) обусловила фронт (время

установления) сигнала ~ 50 (100) нс. Для показанного варианта СВХ с диодным мостом (диоды КД512А в цепи заряда накопительного конденсатора), запираемым за $\sim 1-2$ нс на время хранения T (и время выборки в АЦП) парами синхроимпульсов выборки \overline{BS} и BS , при $T = 10$ нс становится существенным предельное быстродействие элементов ЭСЛ и токового переключателя (транзисторы КТ363Б), а также параметры повторителя (КП307Б). Динамика совмещенной выборки и преобразования БИС АЦП, а также ИС повторителя допускает непосредственное подсоединение (G-G) делителя или усилителя (с уменьшением времени установления $\sim T$ и апертуры). Схемы и технология, один слой платы — шина "земля", другой — согласованные линии и кабели РК50-1-22, с последовательным обходом выхода ИС ЭСЛ, входов и резистора нагрузки, 100 или 50 Ом соответственно на шинах -5 В (2 А), -2 В (1 А), обусловили реализацию динамических характеристик элементов при $T \geq 10$ нс. Это позволяет, учитывая возможную полосу частот сигнала $\sim 10-20$ МГц, длительность исследуемых процессов ~ 100 нс или менее, существенно расширить применение модуля сверхбыстрого цифрового регистратора с частотой дискретизации формы сигналов до 50 МГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вареник Г.А. и др. — ОИЯИ, Р13-89-518, Дубна, 1989.
2. Журавлев В.В. и др. — ОИЯИ, Р9-90-34, Дубна, 1990.
3. Кондаков А.Д., Новиков В.К. — Препринт НИИЭФА, Р-0831, М.: ЦНИИАтоминформ, 1989.
4. Замрий В.Н. — ОИЯИ, 13-86-538, Дубна, 1986.
5. Замрий В.Н. — В сб.: XI Международный симпозиум по ядерной электронике. ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.142.
6. Вагов В.А. и др. — ОИЯИ, 13-89-133, Дубна, 1989.
7. Журавлев В.В. и др. — ОИЯИ, 13-87-633, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1990 года.