

## ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ СБОРА И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 681.39 . 621.317.3

Г. И. ГРИШАКОВ, В. С. ЧУНАЕВ

*(Москва)*

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, РАБОТАЮЩИХ С СИГНАЛАМИ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Для построения быстродействующих цифровых измерительных систем, предназначенных для решения задач, связанных с исследованиями электрических цепей и требующих проведения большого числа точных измерений импульсных сигналов наносекундного диапазона и быстрой обработки получаемых результатов, применяются стробоскопические устройства, которые имеют малое время нарастания переходной характеристики, обладают высокой чувствительностью и позволяют производить цифровой отсчет измеряемых величин [1—6].

В известных стробоскопических цифровых измерительных системах для сопряжения стробоскопического устройства и ЭЦВМ используются цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи. В качестве примера можно привести систему, описанную в [5]. Посредством цифро-аналогового преобразователя, подключенного выходом к узлу развертки стробоскопического устройства, ЭЦВМ производит сдвиг стробимпульсов относительно исследуемого сигнала. Аналого-цифровой преобразователь, подключенный к выходу стробоскопического устройства, осуществляет преобразование низкочастотного выходного напряжения в код, поступающий в ЭЦВМ как результат измерения мгновенного значения напряжения сигнала в момент стробирования. При таком построении системы систематическая ошибка измерений редко бывает ниже 3—5% и зависит главным образом от характеристик элементов стробоскопического устройства, которым присущи нелинейность, дрейф и нестабильность. Кроме того, в подобных системах для измерения фронтов и задержек исследуемых импульсов подсчитывается количество последовательно сдвинутых стробимпульсов до моментов совпадения величин заданных и измеренных напряжений. Эти измерения требуют значительных затрат времени.

Рассматриваемые в настоящей статье принципы построения автоматической измерительной системы основываются на применении ЭЦВМ для осуществления компенсационного цифрового стробоскопического пре-

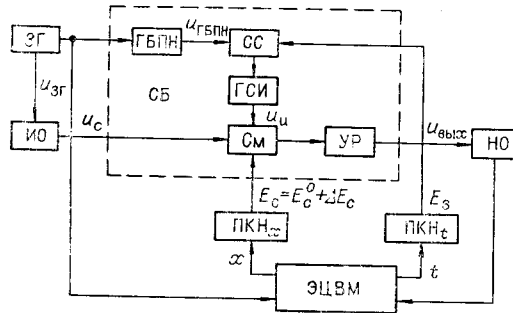


Рис. 1.

образования мгновенных значений исследуемого сигнала. В системе такого типа ЭЦВМ непосредственно участвует в управлении стробоскопическим устройством по двум каналам обратной связи и одновременно может производить первичную обработку результатов по определенным алгоритмам, что позволяет еще более повысить точность и скорость измерений.

Блок-схема системы приведена на рис. 1. Эта система

отличается от известных тем, что в ней для сопряжения стробоскопического блока (СБ) и ЭЦВМ применяются два преобразователя двоичных кодов в напряжения (ПКН<sub>t</sub>, ПКН<sub>x</sub>) и импульсный нуль-орган (НО). В состав стробоскопического блока входят генератор «быстрого» пилообразного напряжения (ГБПН), схема сравнения (СС), генератор строб-импульсов (ГСИ), смеситель (СМ) и импульсный усилитель-расширитель (УР). Описание электрических схем и принципов работы этих элементов можно найти в [6].

Генератор «быстрого» пилообразного напряжения, запускаемый синхронизирующим импульсом задающего генератора (ЗГ), и СС образуют узел переменной задержки строб-импульсов  $u_n$  по отношению к исследуемому сигналу  $u_c$ , т. е. реакции исследуемого объекта (ИО), возбуждаемого основным импульсом задающего генератора. С помощью ПКН<sub>t</sub>, преобразующего двоичный код  $t$  в напряжение  $E_3$ , задается опорный уровень на управляющем входе СС, с которым сравнивается величина «быстрого» пилообразного напряжения  $u_{ГБПН}$ . Устанавливая определенный код  $t$  на входе ПКН<sub>t</sub>, можно управлять величиной задержки строб-импульсов  $T$ .

С помощью ПКН<sub>x</sub>, преобразующего код  $x$  в напряжение  $E_c$ , задается напряжение смещения на нелинейные элементы смесителя, где происходит смещение задержанного на величину  $T$  строб-импульса  $u_n$  и сигнала  $u_c$ . В результате стробирования на выходе УР образуется импульс напряжения  $u_{вых}$  с коротким фронтом и продолжительным спадом. Изменяя код  $x$  на входе ПКН<sub>x</sub>, можно тем самым управлять величиной амплитуды выходного импульса усилителя  $u_{вых}$ .

Импульс усилителя поступает на вход НО с пороговой входной характеристикой. В зависимости от соотношения амплитуды импульса и порога срабатывания НО последний вырабатывает сигнал «больше» или «меньше», который интерпретируется в ЭЦВМ как дискретный сигнал со значениями 1 или 0. Порог срабатывания НО определяет таким образом условный нулевой выходной уровень стробоскопического блока.

На основании получаемой от НО информации о состоянии стробоскопического блока ЭЦВМ производит операции по отработке кода  $t$  или кода  $x$  с целью компенсации отклонения амплитуды выходного импульса усилителя от условного нулевого уровня. Отработку компенсирующего кода можно производить методом последовательных приближений. При этом один из кодов выбирается в качестве независимой переменной величины. Отсюда возможны два режима работы системы.

Положим, что независимой переменной является код  $t$ , а компенсирующей — код  $x$ . При линейном преобразовании кода  $t$  в напряжение  $E_3$  и линейном изменении напряжения  $u_{ГБПН}$  на участке временной раз-

вертки сигнала числовое значение кода  $t$  и величина задержки строб-импульсов  $T$  будут связаны линейной зависимостью

$$T = T_t t, \quad (1)$$

где  $T_t$  — цена единицы младшего разряда кода  $t$ , определяемая при калибровке интервала временной развертки.

ЭЦВМ формирует в процессе отработки компенсирующего кода последовательность кодов  $x_{k+i}$  путем сложения или вычитания в зависимости от значений сигналов НО кодов  $x_{k+i-1}$  и кодов переменного приращения  $\Delta_i$

$$x_{k+i} = x_{k+i-1} \mp \Delta_i = x_0 \pm k\Delta_0 \mp \frac{\Delta_0}{2} \mp \dots \mp \frac{\Delta_0}{2^i}.$$

Перед началом отработки на входе ПКН $_x$  устанавливается некоторый (пусть даже произвольно взятый) код  $x_0$  и выбирается код начального приращения  $\Delta_0 = 2^m$ , где  $m$  — целое число. ЭЦВМ завершает отработку кода  $x$ , когда  $i = m$  и  $\Delta_m = 00\dots 01$ . В результате действия автоматической обратной связи, замыкающейся через смеситель, усилитель-расширитель, нуль-орган, ЭЦВМ и ПКН $_x$ , амплитуда импульса на входе НО будет последовательно приближаться к величине условного нулевого уровня, а напряжение смещения  $E_c$  — к сумме начального напряжения смещения  $E_c^0$  (соответствующего условному нулевому уровню при  $T=0$ ) и напряжения исследуемого сигнала  $u_c(T)$  в заданный момент времени  $T$ .

При линейном преобразовании кода  $x$  в напряжение  $E_c$  результата  $= x_{k+m}(t) - x_{k+m}(0)$  будет пропорционален приращению напряжения смещения  $\Delta E_c(T) = E_c(T) - E_c^0$ . Величина  $\Delta E_c(T)$ , в свою очередь, при идеальном стробоскопическом преобразовании будет равна напряжению исследуемого сигнала  $u_c(T)$ :

$$u_c(T) = \Delta E_c(T) = E_x y(t) = E_x [x_{k+m}(t) - x_{k+m}(0)]. \quad (2)$$

где  $E_x$  — цена единицы младшего разряда кода  $x$ , определяемая при калибровке системы по напряжению.

Как видно из (1) и (2), при работе системы в первом режиме можно измерять мгновенные значения напряжения исследуемого сигнала  $u_c(T)$  для задаваемых моментов времени  $T$  с преобразованием непрерывных величин в цифровую форму.

Второй режим работы системы связан с отработкой кода  $t$  при выборе в качестве независимой переменной кода  $x$ . При отработке компенсирующего кода ЭЦВМ формирует последовательность кодов.

$$t_{k+i} = t_{k+i-1} \mp \Delta_i = t_0 + k\Delta_0 - \frac{\Delta_0}{2} \mp \dots \mp \frac{\Delta_0}{2^i}.$$

Отработка кода  $t$  завершится, когда  $i = m$  и  $\Delta_m = 00\dots 01$ . Автоматическая обратная связь замыкается теперь через смеситель, усилитель-расширитель, нуль-орган, ЭЦВМ, ПКН $_t$ , схему сравнения. В результате действия обратной связи величина задержки строб-импульсов будет последовательно приближаться к значению времени  $T$ , для которого сумма напряжений исследуемого сигнала  $u_c(T)$  и начального смещения  $E_c^0$  равны заданному напряжению  $E_c$ . Чтобы задать требуемый уровень напряжения сигнала  $u_c = \Delta E_c$ , нужно, очевидно, вычислить код  $x = y + x_{k+m}(0)$  задав код  $y$ , и предварительно отработать код  $x_{k+m}(0)$  при  $t = 00\dots 00$ . Как видно, при работе системы во втором режиме можно измерять координаты времени сигнала для задаваемых уровней напряжения с преобразованием непрерывных величин в цифровую форму.

Для нахождения абсолютных значений координат времени и напряжения сигнала по формулам (1) и (2) нужно перемножить величины кодов  $t$  и  $y$  на соответствующие масштабные коэффициенты  $T_t$  и  $E_x$ . Эти линейные соотношения между реальными координатами точек сигнала и их цифровыми эквивалентами будут справедливы, если все промежуточные преобразования в системе осуществляются по идеализированным характеристикам. В действительности всегда наблюдаются как систематические, так и случайные отклонения реальных и идеальных характеристик преобразований, что вносит ошибки в результаты измерений. Чтобы исключить погрешности, обусловленные медленным дрейфом параметров элементов стробоскопического блока и нуля-органа, нужно отрабатывать код  $x(0)$  всякий раз перед обработкой кодов  $x(t)$  и  $t(x)$ .

Для уменьшения случайных ошибок можно проводить статистическую обработку результатов по  $N$  измерениям, совмещая операции по отработке компенсирующих кодов и накоплению промежуточных данных. Среднее значение кода напряжения  $\tilde{y}(t)$  вычисляется по формуле

$$\tilde{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j(t).$$

Аналогично вычисляется среднее значение кода времени  $\tilde{t}(y)$ . Для того чтобы иметь более полное представление о поведении измеряемых величин как случайных переменных, можно совместить процесс измерений с вычислением величин средних отклонений  $\tilde{\Delta y}(t)$  и  $\tilde{\Delta t}(y)$ , позволяющих оценить доверительный интервал и доверительную вероятность при заданном числе измерений  $N$ . Среднее отклонение кода напряжения вычисляется по формуле

$$\tilde{\Delta y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\tilde{y}(t) - y_j(t)|.$$

Эти вычисления можно провести за две серии измерений величин  $y_j(t)$ . За время первой серии находится  $\tilde{y}(t)$ , за время второй —  $\tilde{\Delta y}(t)$ . Аналогичным образом можно определить среднее отклонение кода времени  $\tilde{\Delta t}(y)$ . При выполнении многократных измерений целесообразно применить квазиследящий метод отработки компенсирующих величин для уменьшения времени, расходуемого на измерения.

С целью повышения точности отсчета и измерения координат времени сигнала в рассматриваемой системе можно осуществить способ цифровой коррекции нелинейности развертки, возникающей из-за нелинейного характера изменения «быстрого» пилообразного напряжения  $u_{ГБПН}$ . Сущность этого способа состоит в том, что для получения линейной зависимости между кодом  $t$  и реальной задержкой строб-импульсов  $T$  на вход преобразователя ПКН<sub>t</sub> должен подаваться некоторый код  $\theta$ , являющийся нелинейной функцией кода  $t$ :  $\theta = G(t)$ . Нетрудно показать, что функция  $G(t)$  совпадает с точностью до постоянных коэффициентов с функцией зависимости напряжения  $u_{ГБПН}(T)$  от величины задержки строб-импульсов  $T$ . Для практической реализации цифровой коррекции нелинейности развертки достаточно аппроксимировать функцию  $G(t)$  квадратичным полиномом  $t$ , принимающим на концах и в середине развертки те же значения, что и  $G(t)$ :

$$\theta = t + \Delta_1 t, \quad (3)$$

где

$$\Delta_1 t = \frac{1}{t_{\max}} \left\{ q \frac{1}{t_{\max}} [t(t_{\max} - t)] \right\}; \quad (4)$$

$$q = 4 \left[ G \left( \frac{t_{\max}}{2} \right) - \frac{t_{\max}}{2} \right]. \quad (5)$$

Для нахождения  $G(t_{\max}/2)$  нужно осуществить преобразование реальной координаты времени сигнала  $T$  в код  $t$ , когда величина задержки строб-импульсов равна половине длительности развертки. Это преобразование имеет место во время работы системы во втором режиме ЦВУ: примером частоты времени сигнала для различного положения выше принципов компенсационного цифрового стробоскопического преобразования, является стробоскопический цифровой измеритель сигналов (СЦИС) [7]. На рис. 2 приведена функциональная схема арифметического блока ЦВУ СЦИС, реализующего рассмотренные алгоритмы измерений и первичной обработки информации без цифровой коррекции нелинейности развертки.

Все арифметические действия над кодами, кроме деления на два кода приращения  $\Delta_j$ , выполняются комбинационным сумматором (КС) с двумя регистрами слагаемых (РС<sub>1</sub>, РС<sub>2</sub>). Регистры РРР<sub>1</sub> и РРР<sub>2</sub> служат для хранения промежуточных результатов вычислений. Код  $t$  хранится в регистре РК<sub>*t*</sub>, регистр ПКН<sub>*t*</sub> управляет преобразователем ПКН<sub>*t*</sub>. Код  $x$  хранится в регистре РК<sub>*x*</sub>, который управляет преоб-

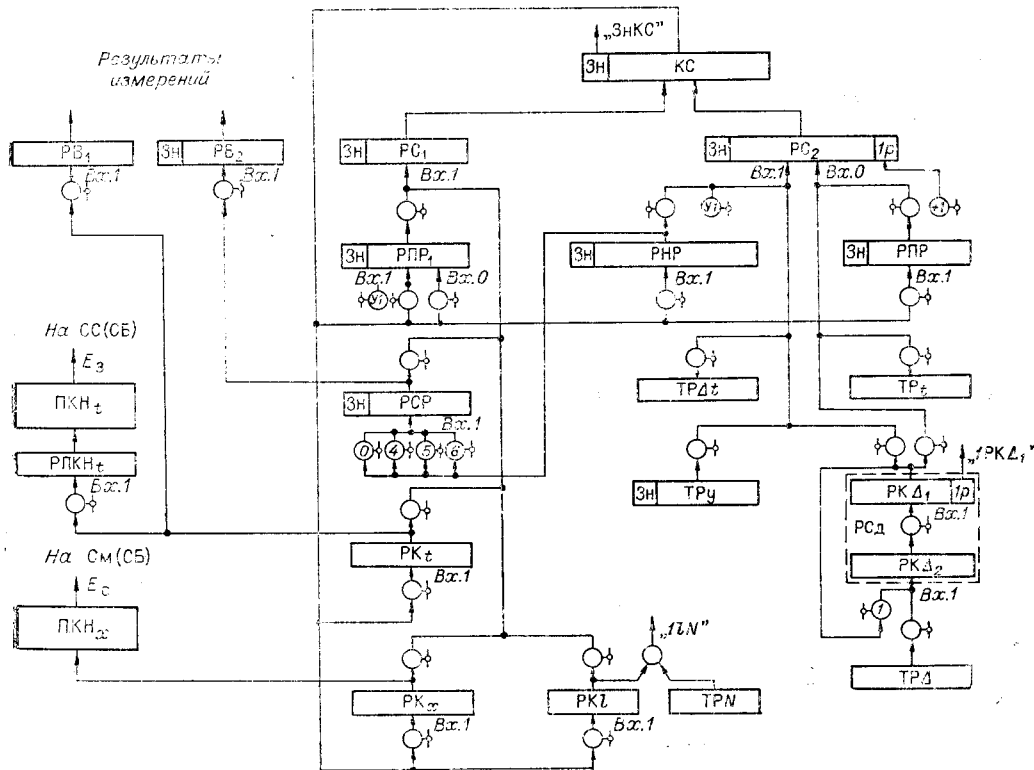


Рис. 2.

разователем ПКН<sub>x</sub>. Результаты повторных измерений накапливаются в регистре РНР. Вычисление средних значений производится путем передачи содержимого этого регистра в регистр средних величин РСР со сдвигом на соответствующее число разрядов  $\lambda$ , равное показателю степени закодированного числа  $N = 2^\lambda$ . Для этого служит группа вентиля с индексами  $\lambda = 0, 4, 5, 6$ .

Для хранения и деления на два кода  $\Delta_i$  используется сдвиговый регистр РСД, состоящий из двух регистров РК $\Delta_1$  и РК $\Delta_2$ . Для вывода результатов измерений служат выходные регистры РВ<sub>1</sub> и РВ<sub>2</sub>, выполняющие также функции буферной памяти, позволяющей совместить во времени операции по измерению, обработке и выводу результатов.

Задание исходных данных для измерений (шага приращения времени, координат времени, интервала измерений, уровней напряжения, начального кода приращения, числа повторных измерений) производится на тумблерных регистрах ТР $\Delta t$ , ТР $t$ , ТР $u$ , ТР $\Delta$  и ТР $N$ .

Ввиду того, что результаты измерения напряжения могут быть положительными и отрицательными числами, старшие разряды сумматора и некоторых регистров используются как знаковые (Зн). Отрицательные числа представляются в ЦВУ обратными кодами.

Кроме арифметических действий с числовыми кодами, арифметический блок вырабатывает также несколько сигналов, используемых для формирования признаков выполнения тех или иных операций. К ним относятся: сигнал «/РК $\Delta_1$ », образующийся на выходе младшего разряда регистра РК $\Delta_1$  после  $m$ -кратного сдвига кода  $\Delta_0$ ; сигнал «/IN», указывающий, что число повторных измерений  $l$ , хранящееся в регистре РК $l$ , равно заданному числу  $N$ ; сигнал «ЗнКС», образующийся на выходе знакового разряда сумматора.

ЦВУ СЦИС реализовано на диодно-транзисторных логических элементах, работающих с тактовой частотой 2,5 МГц.

В СЦИС применяются 11-разрядные цифро-аналоговые преобразователи. Максимальная частота их работы в устройстве не ниже 10—20 кГц. При такой частоте повторения исследуемого сигнала на измерение координат одной точки затрачивается не более 2—4 мс, что эквивалентно проведению в секунду свыше 250—500 измерений. Основной составляющей систематической погрешности измерений СЦИС является погрешность дискретности. По полученным оценкам, при достаточно малом времени нарастания переходной характеристики стробоскопического блока суммарная ошибка измерений не превышает 0,2—0,3% (без учета погрешности калибровки масштабов измерений и нелинейности развертки).

В заключение приведем пример экспериментального исследования, выполненного с помощью СЦИС. Как известно, при динамических испытаниях электронных логических элементов точность измерения их параметров зависит от стабильности параметров испытательных импульсов. С помощью СЦИС проводились измерения напряжения испытательного импульса  $u_c$  и средних отклонений  $\Delta u_c$  при различном числе измерений  $N = 1, 16$  и  $N = 64$ . Результаты этих измерений приведе-

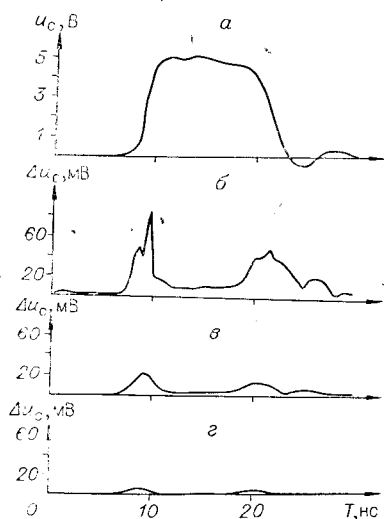


Рис. 3.

ны на рис. 3, *a—г* соответственно. На основании этих данных оценивалось влияние нестабильности фронта, амплитуды и спада испытательного импульса на точность измерения динамических параметров (в частности, импульсной помехозащищенности) исследуемых схем. При проведении экспериментов в качестве стробоскопического блока использовалась строб-приставка С1-21 с временем нарастания переходной характеристики около 1,5 нс. Результаты измерений выводились из ЦВУ СЦИС через цифропечатающее устройство и двухкоординатный самописец.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Grove. A New DC—4000 Mc Sampling Scope Plug—in With Signal Feedthrough Capability.—Hewlett—Packard Journal, 1964, v, 15, № 8.
2. Tektronix Oscilloscopes and Associated Instruments.—Internation Edition, Catalog 24, mid 1965—mid 1966.
3. В. М. Горячев, Ю. А. Рябинин. Стробоскопическое устройство с временем установления менее 0,2 нсек.—Вопросы радиоэлектроники, серия «Радиоизмерительная техника», 1966, вып. 2.
4. Sampling Oscilloscopes.—Electronic Design, 1967, № 20.
5. P. E. Stucker, G. F. Bland. Automatic Dynamic Response Analyzer.—IBM Journal of Research and Development, 1968, v. 12, № 4.
6. Ю. А. Рябинин. Стробоскопическое осциллографирование сигналов наносекундной длительности. М., «Советское радио», 1968.
7. Г. И. Гришаков, В. П. Гусев, В. В. Лозовой, Г. А. Судаков. Стробоскопический цифровой измеритель сигналов.—Авторское свидетельство № 292172.—ОИПОТЗ, 1971, № 4.

*Поступила в редакцию  
5 марта 1971 г.  
окончательный вариант —  
8 июля 1971 г.*