



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Дубна**

P13-2000-63

И.Р.Русанов, И.Х.Атанасов\*

**МНОГОФАЗНЫЙ ИНТЕРПОЛЯТОР  
ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ВРЕМЯ–КОД**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

\*ИЯИЯЭ БАН, София

**2000**

## 1. Введение

Счетно-импульсный метод кодирования интервалов трудно применить для измерений с наносекундной и пикосекундной точностью, так как при этом частота времязадающего генератора должна достигать  $10^9$ - $10^{10}$  Гц. Поэтому для кодирования временных интервалов с высокой точностью применяют комбинированные методы. Основную часть временного интервала (ВИ) измеряют «заполнением» ее последовательностью импульсов времязадающего генератора, а оставшиеся отрезки – методами, разработанными для малых интервалов [1-3].

Задача формирования «точных» ВИ для измерения блоками интерполяции комбинированных преобразователей время-код (ПВК) во многих отношениях родственна традиционной задаче селекции входных сигналов в рабочем диапазоне. В обоих случаях важно получить минимальные погрешности оценок временных положений стартового и стопового сигналов относительно импульсов времязадающей серии. В ПВК комбинированного типа схемы селекции могут вызвать спорадические неоднородности характеристик преобразования вследствие возможных просчетов по грубой шкале [2,3]. Поэтому временное разрешение и точность преобразования в приборах, работающих по комбинированному методу, в значительной степени определяются построением схемы для выделения интерполяционных интервалов. Все это приводит к необходимости решения нетривиальной задачи стыковки шкал различного весового достоинства. Проблема снижения погрешностей выделения точных интервалов и устранения неоднородности «грубого» измерения является одной из центральных при реализации комбинированных методов измерения ВИ.

## 2. Многофазный алгоритм для измерения «остаточных» интервалов

В работе предложен многофазный интерполяционный алгоритм для измерения «остаточных» интервалов в комбинированных преобразователях время-код. В этом алгоритме эталонные импульсные серии, формирующие дискретные шкалы преобразований, имеют одинаковый эталонный период повторения  $T_e$  и сдвинуты друг относительно друга по правилу

$$\varphi_{ij} = (i - j) \frac{T_e}{M}, \quad (1)$$

где  $i, j$  – номера импульсных серий ( $i, j = [1 \dots M]$ ).

При сопоставлении каждого ВИ с дискретными шкалами для его длительности формируется множество оценок –  $\{T_{ij}^M\}_{i=j}$ . При помощи этого множества оценок и рассмотренного алгоритма для выбора оптимальной оценки можно повысить точность измерения временного интервала.

## 2.1. Преобразователь время-код с двухфазным интерполятором

Счетно-импульсный преобразователь время-код работает по принципу счета двоичным счетчиком импульсов стабильной частоты следования, которыми заполняется измеряемый интервал. Для уменьшения дифференциальной нелинейности в этих преобразователях используется фазировка начала и конца временного интервала с импульсами опорного генератора. Этот способ за счет простой схемы фазирования позволяет снизить дифференциальную нелинейность до долей процента при опорных частотах до 200 МГц, а при опорных частотах до 500 – 1000 МГц [1,2] – до единиц процентов.

В ПВК счетно-импульсного типа сигналы старта и стопа поступают на входное логическое устройство, вырабатывающее импульс, равный по длительности измеряемому ВИ. Он поступает на информационный вход триггера, осуществляющего функцию фазирования [3]. На выходе этого триггера формируется «интервальный» импульс, фронт и срез которого жестко связаны с импульсами опорного генератора. Этот импульс заполняется импульсами эталонной серии. Анализ работы схемы фазирования показывает, что логические элементы, осуществляющие функцию фазирования, вводятся по управляющему фронту первого тактового импульса эталонной серии за стартовым и стоповым сигналами. Если в ПВК используют две противофазные последовательности импульсов опорной частоты, то по очередности срабатывания схемы фазирования можно определить моменты прихода стартового и стопового сигналов относительно фазы опорной серии. На базе этой информации можно повысить вдвое временное разрешение и точность измерения.

Рассмотрим схему и принцип действия интерполятора, в котором повышение временного разрешения достигается использованием двух противофазных эталонных серий и схемы фазирования стартового и стопового сигналов (рис.1). На рис.2 приведена временная диаграмма работы ПВК.  $D$ -триггеры в стартовом  $M_{1-1}$  и стоповом  $M_{1-2}$  каналах запускаются фронтом входных импульсов по тактовому входу. Стоповой триггер  $M_{1-2}$  в исходном состоянии заблокирован. При появлении стартового сигнала, несущего информацию о начале временного интервала, измеряется временное положение его переднего фронта относительно противофазных последовательностей импульсов эталонной частоты. Для этого используются два триггера ( $M_{3-1}$  и  $M_{3-2}$ ) с обратной связью. Временная метка с выхода стартового триггера  $M_{1-1}$ , несущая информацию о «точном» времени, поступает на  $D$ -входы триггеров. Триггер  $M_{3-1}$  переключается по тактовым импульсам опорной частоты, управляющей счетчиком «грубо», а  $M_{3-2}$  – по противофазным тактовым импульсам. После срабатывания триггера  $M_{3-1}$  (или  $M_{3-2}$ ) блокируется триггер  $M_{3-2}$  (или  $M_{3-1}$ ). Поэтому, при появлении стартового сигнала, срабатывает только один из триггеров:  $M_{3-1}$  или  $M_{3-2}$ . Их выходы устанавливаются в состояние, соответствующее времени прихода стартового сигнала относительно управляющих фронтов противофазных импульсных последовательностей.

При помощи триггеров  $M_{4-1}$  и  $M_{4-2}$  с момента прихода стопового сигнала также происходит «интерполяция» его временного положения относительно импульсов тактового генератора. По принципу действия и схемотехнике стоповый интерполятор аналогичен стартовому интерполятору.

Для устранения дифференциальной нелинейности типа «чет-нечет» необходимо исключить т.н. «резаные» импульсы в начале и конце серии, подаваемой на счетчик «грубо». С этой целью в описываемом устройстве применена двухступенчатая схема синхронизации фронтов измеряемого интервала с импульсами опорного генератора. При помощи  $D$ -триггеров  $M_5$  и логических элементов  $M_6$  после срабатывания каждого из интерполяторов формируется первый «интервальный» импульс. Он подается на  $D$ -вход триггера  $M_{8-1}$ . На его тактовый вход поступают импульсы с противофазного выхода времязадающего генератора. На выходе элемента  $M_{8-1}$  фронт и срез второго «интервального» импульса по временному положению однозначно связаны с противофаз-

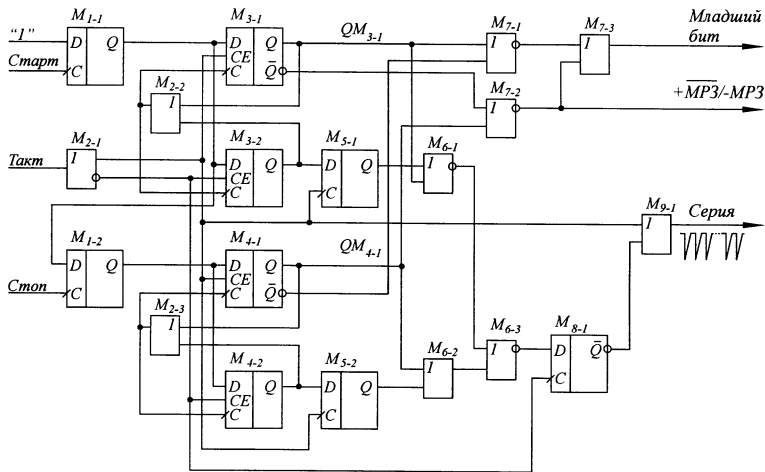


Рис.1. Функциональная схема двухфазного интерполятора.  
 $M_1, M_3 - M_5, M_8$  – MC10130;  $M_2, M_6, M_7$  – MC10105

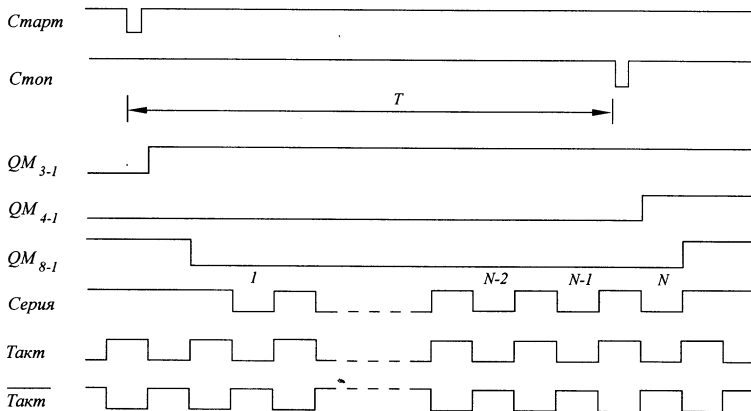


Рис.2. Временная диаграмма работы двухфазного интерполятора

ными импульсами генератора. С выхода элемента пропускания  $M_{9,l}$  серия импульсов подается на счетчик «грубо». Эта схема фазирования устраняет полностью «резаные» импульсы в серии. Кроме этого, результаты «грубого» и «точного» измерения стыкуются автоматически. После окончания серии все выходы счетчика остаются в состояниях, соответствующих измеряемому интервалу, в результате чего формируется оценка «грубо» с точностью до периода времязадающего генератора.

По состоянию выходов триггеров  $M_{3,l}$  и  $M_{4,l}$  можно определить время прихода стартового и стопового сигналов относительно импульсов эталонной серии, управляющей счетчиком «грубо», с точностью до половин эталонного периода. В зависимости от момента прихода стартового и стопового сигналов выходы интерполяционных триггеров устанавливаются в следующих состояниях.

1.  $QM_{3,l} = 1$  и  $QM_{4,l} = 1$ . В этом случае «интервальные» импульсы относительно обеих противофазных последовательностей имеют одинаковую длительность. Тогда количество импульсов, заполняющих каждый «интервальный» импульс, равно. Следовательно, оценка ВИ определяется из соотношения

$$\bar{T} = NT_e, \quad (2)$$

где  $N$  – количество импульсов в серии,  $T_e$  – эталонный период.

2.  $QM_{3,l} = 0$  и  $QM_{4,l} = 1$  – «интервальный» импульс, заполняемый импульсами эталонной частоты на один период меньше, чем «интервальный» импульс, сформированный относительно противофазной опорной серии. Оценка временного интервала определяется из соотношения

$$\bar{T} = \frac{2N+1}{2}T_e. \quad (3)$$

3.  $QM_{3,l} = 1$  и  $QM_{4,l} = 0$  – «интервальный» импульс, сформированный относительно противофазной опорной серии на один период меньше «интервального» импульса, заполняемого импульсами эталонной частоты. Поэтому оценка измеряемого временного интервала определяется из соотношения

$$\bar{T} = \frac{2N-1}{2}T_e, \quad (4)$$

где  $N$  – количество импульсов в серии.

4.  $QM_{3-l} = 0$  и  $QM_{4-l} = 0$ . Оценка временного интервала определяется из соотношения (2).

Таким образом, применение двухфазного алгоритма измерения с дополнительными схемами фазирования стартового и стопового сигналов обеспечивает повышение точности оценок временных интервалов до половины периода времязадающего генератора.

## 2.2. Четырехфазный интерполятор

На рис.3 приведена схема 4-фазного интерполятора. Реализация интерполяционного алгоритма «остаточных» интервалов осуществляется на базе рассмотренного двухфазного интерполятора. При этом для каждого нового тактового сигнала, формирующего дополнительную дискретную шкалу, добавляется схема фазирования с обратной связью (примерно для  $Takt_2 - D$ -триггеры  $M_7, M_8$  схема «И» –  $M_3$ ). В данном случае импульсные последовательности  $Takt_1 - Takt_4$  имеют одинаковый эталонный период и коэффициент заполнения – 50%. Они сдвигаются относительно «основного» тактового сигнала  $Takt_1$  по правилу

$$\varphi_{ij} = (i - j) \frac{T_c}{8}. \quad (5)$$

После появления сигнала, задающего начало временного интервала, последовательность работы интерполятора аналогична работе двухфазного интерполятора. Определяется время прихода стартового импульса относительно фазы тактового сигнала  $Takt_1$ . При помощи двухступенчатой схемы синхронизации стартового сигнала последовательно формируются два «интервальных» импульса. При этом начало второго «интервального» импульса по временному положению жестко связано с отрицательным фронтом первого за ним импульса тактового сигнала  $Takt_1$ . Снимается блокировка с элемента  $M_{2j}$  и серия импульсов подается на счетчик «грубо».

Все остальные схемы фазирования устанавливаются в состояниях, соответствующих времени прихода стартового сигнала относительно фазы каждой из импульсных последовательностей  $Takt_2 - Takt_4$ .

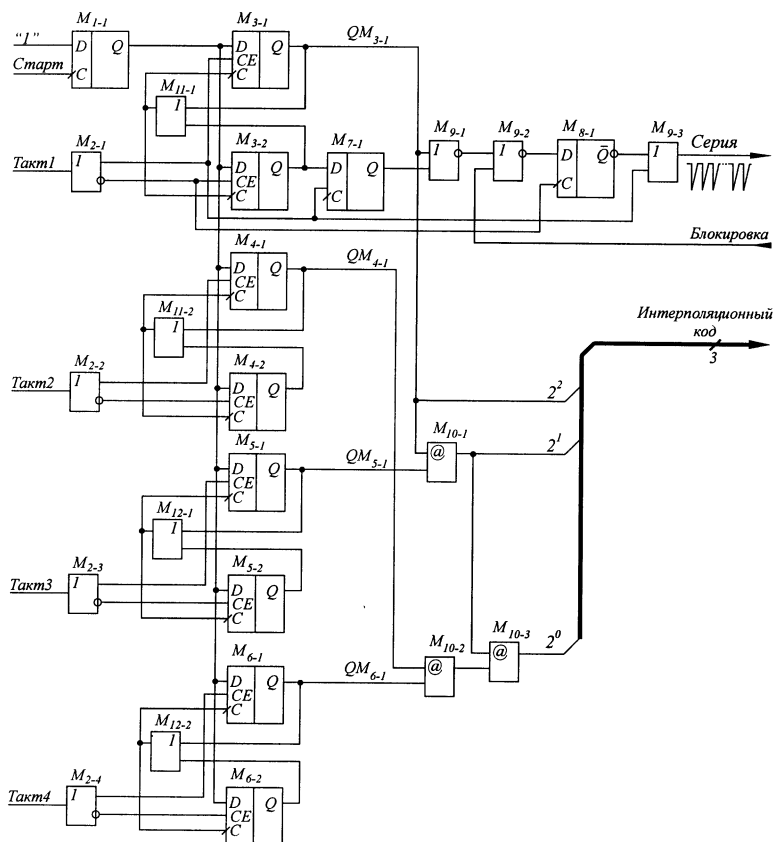


Рис.3. Функциональная схема 4-фазного интерполятора в стартовом канале.  
 $M_1, M_3 - M_7, M_8$  – MC10130;  $M_2$  – MC10101;  $M_9, M_{11}, M_{12}$  – MC10105;  
 $M_{10}$  – MC10107



В схему интерполятора добавлен вход «блокировка». На этот вход подается сигнал со стопового интерполятора, задающий конец первого «интервального» импульса. При появлении сигнала «блокировка» и его синхронизации относительно тактового сигнала  $Takt_1$  блокируется элемент  $M_{21}$ . После окончания серии все выходы счетчика остаются в состояниях, соответствующих измеряемому интервалу, в результате чего формируется оценка «грубо».

Так, при применении четырех схем фазирования с обратной связью в восемь раз улучшается точность измерения временных интервалов. Оценка «грубо» ВИ определяется из соотношения

$$\bar{T}_{Takt1} = NT_e, \quad (6)$$

где  $T_e$  – эталонный период времени задающего генератора,  $N$  – количество импульсов в серии. По состояниям выходов схем фазирования, после прихода стартового сигнала интерполяционный код определяется следующим образом.

1. Старший бит  $b_2$ : его значение определяется относительно основной тактовой частоты  $Takt_1$ :

$$b_2 = QM_{3-1}, \quad (7)$$

2. Бит  $b_1$ : его значение определяется относительно импульсных последовательностей  $Takt_1$  и  $Takt_3$ :

$$b_1 = QM_{3-1} \oplus QM_{5-1}, \quad (8)$$

3. Младший бит  $b_0$ : его значение зависит от состояний всех схем фазирования:

$$b_0 = ((QM_{3-1} \oplus QM_{5-1}) \oplus (QM_{4-1} \oplus QM_{6-1})), \quad (9)$$

По принципу действия и схемотехнике в стоповом канале используется интерполятор, аналогичный стартовому интерполятору. Здесь формируется оценка –  $N_2$ .

4. «Точная» оценка измеряемого временного интервала определяется из соотношения

$$\bar{T} = NT_e + \frac{N_1 - N_2}{8} T_e, \quad (10)$$

где  $NT_e$  – оценка «грубо»,  $N_1$  и  $N_2$  – оценки временных положений стартового и стопового сигналов относительно основной тактовой частоты.

Данный интерполяционный алгоритм реализован в ПВК [5]. Преобразователь разработан на основе многократно программируемых логических матриц фирмой *XILNX*. Линейность интерполятора экспериментально определена по так называемому «белому спектру». С этой целью в качестве стартового сигнала использовались случайно распределенные во времени импульсы с генератора КА316 [4], а на стоповый вход подавались импульсы стандартного генератора.

На рис.4 приведено полученное распределение суммарного интерполяционного кода. Дифференциальная нелинейность составляет 1%. Проведенные тесты показали, что вследствие неидеальности применяемых элементов (ненулевое время подготовки по  $D$ -входу триггеров и ненулевое время срабатывания логических элементов) полностью устранить нелинейности интерполяторов не удастся. Поэтому для заданной эталонной частоты к идеальному результату можно приближаться, если минимальный период импульсов генератора определяется по правилу

$$0.5T_e \geq T_{FF} - T_{EC} + T_{\&}, \quad (11)$$

где  $T_{FF}$  – время срабатывания триггеров,  $T_{EC}$  – минимальное время подготовки по  $EC$ -входу триггеров,  $T_{\&}$  – время задержки элемента «И».

Выполнение условия (11) обеспечивает правильность работы схемы фазирования с обратной связью. Кроме этого, при заданной точности преобразования время-код  $\Delta T$  для достижения минимальной нелинейности необходимо выполнение условия

$$\Delta T \geq T_D, \quad (12)$$

где  $\Delta T$  – цена канала ПВК,  $T_D$  – минимальное время подготовки по  $D$ -входу триггеров интерполятора.

### 3. Заключение

Представленный многофазовый алгоритм для измерения «остаточных» интервалов реализован в преобразователе [5]. В данном модуле роль интерполяторов исполняют схемы с обратной связью. При этом стартовая и стоповая зоны неопределенности не выделяются. «Точные» цифровые коды, соответствующие времени прихода стартового

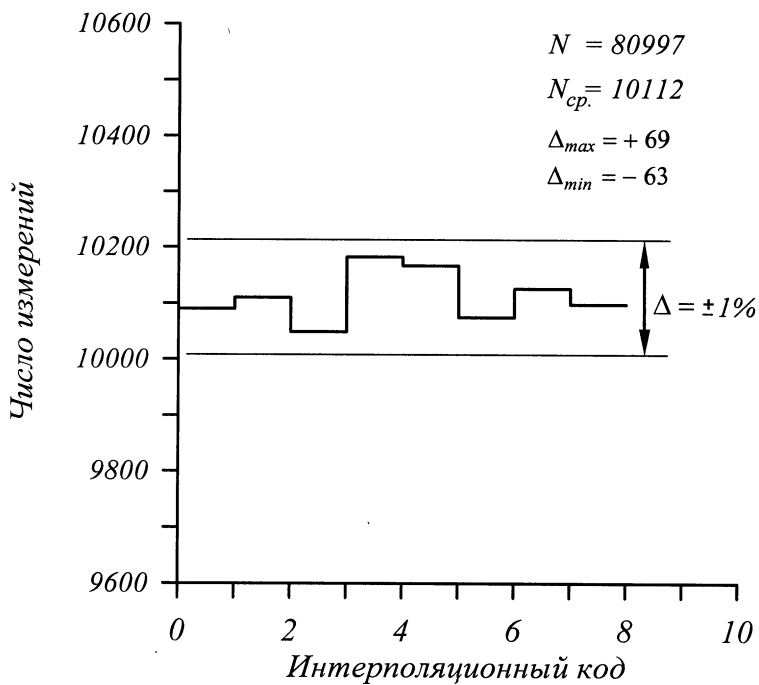


Рис.4. Распределение интерполяционного кода четырехфазного интерполятора

и стопового сигналов относительно импульсных последовательностей, определяются по состояниям выходов схем с обратной связью.

Этот измерительный алгоритм позволяет решить проблему, связанную со стыковкой шкал различного весового достоинства – стыковка получается автоматически. Это не только упрощает реализацию преобразователя время-код, но и повышает стабильность и надежность его работы.

Авторы выражают свою благодарность А.Г. Литвиненко и С.В. Афанасьеву за интерес к работе и полезные обсуждения. Мы очень признательны проф. В.Н. Пеневу за постоянное внимание и поддержку нашей работы.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Потопов А.В., Чернявский А.Ф. Статистические методы измерений в экспериментальной ядерной физике. М.:Атомиздат, 1980.
2. Цитович А. П. Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат. 1984.
3. Мелешко Е. А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Гребенюк В.М., Селиков А.В. Препринт ОИЯИ Р10-90-335, Дубна,1990.
5. Русанов И.Р., Атанасов И.Х. Многоканальный измеритель временных интервалов для дрейфовых камер. Краткие сообщения ОИЯИ, 1998, №6[92], с. 55.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 марта 2000 года.

Русанов И.Р., Атанасов И.Х.  
Многофазный интерполятор  
для комбинированных преобразователей время–код

P13-2000-63

В работе описывается многофазный алгоритм для измерения «остаточных» интервалов в комбинированных преобразователях время–код. Новый интерполяционный алгоритм разработан для применения в многоканальных многостоповых преобразователях время–код. Новый тип интерполятора позволяет получить временное разрешение  $T_c/8$  для эталонного периода  $T_c$  времязадающего генератора.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Rusanov I.R., Atanassov I.H.  
A Multiphase Interpolator for the Time-To-Digital Converters

P13-2000-63

An interpolation algorithm for time-to-digital converter based on the direct transformation method is described in the work. The new measuring algorithm is designed for application in the TDC for readout of information from the drift chamber. The new multiphase digital interpolators permit to achieve the high time resolution of  $T_c/8$ , where  $T_c$  is a period of clock generator.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 20.04.2000  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,33  
Тираж 315. Заказ 51994. Цена 1 р. 60 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области