

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.795.2

Г.Н. Абрамов, Ю.Г. Абрамов

СТРУКТУРНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НИИУСНО-ИМПУЛЬСНЫХ ВРЕМЯ-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Абрамов Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета, Почетный работник высшего профессионального образования России. Имеет научные работы в области аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований моноимпульсных электрических сигналов (МИЭС). [e-mail: yuran_a@mail.ru].

Абрамов Юрий Геннадьевич, магистр техники и технологии по направлению «Электронные приборы и устройства», окончил Тольяттинский государственный университет. Имеет научные работы в области аналого-цифровых преобразований параметров МИЭС. [e-mail: yuran_a@mail.ru].

Аннотация

Рассматривается структурный способ повышения в два раза быстродействия рециркуляционных нониусно-импульсных время-цифровых преобразователей (ВЦП) при двух режимах работы и заданной дискретности преобразования менее одной наносекунды. При первом режиме период рециркуляции старт-импульса выбирается больше наибольшего значения длительности преобразуемого временного интервала (ВИ) и состоит в том, что старт- и стоп-импульсы преобразуемого ВИ, подвергаются рециркуляции в соответствующих им старт- и стоп-рециркуляторах с периодами рециркуляции, отличающимися на значение заданной дискретности преобразования и подсчете числа рециркуляций стоп-импульса со времени его ввода в стоп-рециркулятор и до времени совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов, причем в каждой из рециркуляций длительность старт-импульса расширяется на значение заданной дискретности преобразования, а длительность стоп-импульса остается неизменной. При втором режиме период рециркуляции старт-импульса выбирается меньше наибольшего значения длительности преобразуемого ВИ, а весь процесс преобразования осуществляется в два этапа. На первом этапе за время действия преобразуемого ВИ с дискретностью преобразования, равной периоду рециркуляции старт-импульса, осуществляется подсчет числа его рециркуляций, в то время как на втором этапе с заданной дискретностью преобразования производится подсчитывание числа рециркуляций стоп-импульса со времени его ввода в стоп-рециркулятор и до времени совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов, что позволяет определить цифровой результат преобразования. Причем если во время первого этапа преобразования длительность рециркулирующего старт-импульса остается неизменной, то во время второго этапа в каждой из рециркуляций его длительность расширяется на значение заданной дискретности преобразования. В то же время длительность стоп-импульса в процессе рециркуляций остается неизменной.

Для повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при двух режимах работы предложен способ, в котором операции расширения старт-импульса в каждой из рециркуляций исключаются, а период его рециркуляции увеличивается на значение заданной дискретности преобразования. Приводятся примеры аппаратурной (схемотехнической) реализации предложенных способов и рекомендации по их применению.

Ключевые слова: рециркуляция, период рециркуляции, дискретность преобразования, время-цифровой преобразователь, цифровая линия задержки, временной интервал, старт- и стоп-импульсы, импульсная последовательность, старт-рециркулятор, стоп-рециркулятор.

STRUCTURAL WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF RECIRCULATION VERNIER- ULSE TIME-DIGITAL CONVERTERS

Gennady Nikolayevich Abramov, Doctor of Engineering; Professor at 'Industrial Electronics' Department of Tolyatti State University; Honored Worker of Higher Professional Education of Russia; research interests include the analog-digital and digital-analog conversion of multipulse electric signals. e-mail: yuran_a@mail.ru.

Yuriy Gennadievich Abramov, Master of Engineering and Technology in 'Electronic Devices and Appliances'; graduated from the Tolyatti State University; an author of papers in the field of analog-to-digital conversions parameters of multipulse electric signals. e-mail: yuran_a@mail.ru.

Abstract

The article examines a structural method for increasing twice the speed of the recirculation vernier pulse-time-to-digital converters (TDC) with two operating modes and discrete transformations given less than one nanosecond. In the first mode, the period of the start pulse recirculation is selected higher than the highest duration values of the converted time slot (TS). This mode consists of the fact that the start and the stop pulses of the converted TS are recycled in their respective start and stop recirculators recycling with the periods differing by the value of specified discrete transformations, and the fact that the stop pulse recirculation number is counted from the time it enters the stop-recirculator and until the time the recirculation start- and stop-pulses match. At this, each of the recirculations has the start pulse duration extended to a predetermined value of discrete transformations, and the stop pulse duration remains unchanged.

In the second mode, the period of the start pulse recirculation is selected less than the highest duration values of the converted TS, and the whole conversion process is carried out in two stages. At the first stage, the number of recirculations is counted during the TS conversion having the readability equal to the period of the start-pulse recycling, while at the second stage, the number of the stop pulse recirculations is counted with given discrete transformations made from the time it enters the stop- recirculator and recirculated until the time matches the start and stop pulses, allowing you to identify the digital conversion result. And if, during the first stage of transformation recycle start- duration pulse remains unchanged, at the second stage, its duration is extended by the given value of discrete transformations in each of recycles. At the same time, the stop pulse duration remains unchanged in the recycling process.

To improve the reliability of the recirculation vernier - conversion TDC pulse at the two modes, a method is provided, wherein the start pulse expansion operations are excluded in each of the recirculations, and the recycling period increases by the predetermined discrete transformation. The article gives examples for the hardware (circuit) implementation of the proposed methods and recommendations for their use.

Key words: recirculation, recycling period, discrete transformations, time-to-digital converter, digital delay line, time slot, start and stop pulses, pulse sequence, start-recirculator, stop-recirculator.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически во все технические системы (ТС) встраивают измерительные вычислительные комплексы (ИВК) диагностики и контроля, которые осуществляют постоянный мониторинг состояния ТС. При этом большинство параметров, за которыми необходим жесткий контроль, прямо или косвенно связаны с измерением (преобразованием) времени в цифровой форме с дискретностью преобразования τ менее 1 нс в ВЦП. Обычно измеряемое время задается электрическими сигналами в виде старт- и стоп-импульсов, ВИ между которыми длительностью t_x преобразуют в цифровой код в ВЦП. С повышением требований к быстродействию и точности ИВК ТС возрастают требования и к их составной части – ВЦП.

При создании ВЦП, а это, напомним, преобразователи время-код (ПВК) с $\tau \ll 1$ нс, применяется только один из прямых способов преобразования – способ задержанных совпадений. В нем старт-импульс преобразуемого ВИ подвергают многоканальному временному сдвигу с дискретностью сдвига, равной τ , а затем осуществляют фиксацию

совпадений сдвинутых по времени старт-импульсов со стоп-импульсом и по количеству зафиксированных совпадений определяют цифровой результат преобразования [1]. Обладая таким достоинством, как высокое быстродействие, практически преобразование осуществляется за время действия преобразуемого ВИ длительностью t_x , способ имеет большой объем аппаратных затрат, значительно возрастающих при $\tau \ll 1$ нс или при увеличении временного диапазона преобразуемых ВИ.

Из косвенных способов время-цифрового преобразования особо выделяется рециркуляционный способ преобразования и его разновидности. Например, известен способ рециркуляционного нониусно-импульсного преобразования ВИ, основанный на рециркуляции старт- и стоп-импульсов в соответствующих им старт- и стоп-рециркуляторах с периодом T_{cm} старт-импульса и периодом $T_{cn} = T_{cm} - \tau$ стоп-импульса и подсчете числа рециркуляций стоп-импульса со времени его ввода в стоп-рециркулятор и до времени совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов [2, 3]. Способ имеет возможность работы в режимах $t_x < T_{cm}$ и $t_x > T_{cm}$, где t_x –

наибольшее значение длительности преобразуемого ВИ. Однако, обладая таким подкупающим преимуществом, как небольшой объем аппаратных затрат, необходимый на его реализацию, он имеет существенный недостаток в виде низкого быстродействия преобразования.

В связи со сказанным, актуальной задачей является повышение качества рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП.

Ниже рассматриваются способ повышения быстродействия в два раза рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП за счет сокращения числа рециркуляций и способ повышения надежности преобразования путем упрощения в них процесса преобразования. Приводятся примеры схемотехнической реализации предложенных способов и рекомендации по их применению.

Структурный способ повышения быстродействия рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП в два раза в режиме $t_{x_{max}} < T_{cm}$ (первый вариант) заключается в том, что старт- и стоп-импульсы, соответствующие началу и концу преобразуемого ВИ длительностью

t_x (область изменения $t_x \in [t_{x_{min}}; t_{x_{max}}]$), здесь $t_{x_{min}}$ – наименьшее значение длительности преобразуемого ВИ), подвергаются рециркуляции в соответствующих им старт- и стоп-рециркуляторах с периодом рециркуляции T_{cm} старт-импульса и периодом рециркуляции $T_{cn} = T_{cm} - \tau$ стоп-импульса и подсчете числа рециркуляций стоп-импульса со времени его ввода в стоп-рециркулятор и до времени совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов, причем в каждой из рециркуляций длительность старт-импульса t_{cm} расширяют на значение τ , а длительность стоп-импульса t_{cn} оставляют неизменной, при этом для обеспечения необходимого временного диапазона преобразования $T_{cm} > t_{x_{max}}$ [4].

Импульсные последовательности, вырабатываемые в процессе рециркуляций в старт- и стоп-рециркуляторах, описываются выражениями, соответственно, старт-рециркулятора

$$f_{cm}(t) = f(t_{cm} + n_{cm} \tau + n_{cm} T_{cm}), \quad (1)$$

здесь второе слагаемое $n_{cm} \tau$ представляет результат расширения t_{cm} на значение дискретности преобразования τ в каждой из n_{cm} рециркуляций старт-импульса, а стоп-рециркулятора

$$f_{cn}(t) = f(t_x + t_{cn} + n_{cn} T_{cn}), \quad (2)$$

где область изменения числа рециркуляций стоп-импульса $n_{cn} \in [1; N_{cn}]$, а число уровней дискретизации $N_{cn} = N = t_{x_{max}} / \tau$.

Момент совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов соответствует равенству

$$f_{cm}(t) = f_{cn}(t). \quad (3)$$

Тогда длительность

$$t_x = (t_{cm} - t_{cn}) + n_{cm} \tau + n_{cm} T_{cm} - n_{cn} T_{cn}.$$

Так как по условию работоспособности

$$t_{x_{max}} < T_{cm}, \quad n_{cn} = n_{cm}, \quad (4)$$

$$T_{cm} - T_{cn} = \tau \quad (5)$$

и обеспечивается условие

$$t_{cm} = t_{cn} > \tau, \quad (6)$$

длительность преобразуемого ВИ

$$t_x = 2n_{cm} \tau. \quad (7)$$

Число рециркуляций стоп-импульса n_{cn} фиксируется счетчиком импульсов информационной емкостью в $m_{cn} = \log_2(N_{cn} + 1)$ разрядов позиционного двоичного кода (ПДК), а получение значения $2n_{cn}$ (цифрового результата преобразования) осуществляется путем добавления младшего разряда со значением разряда «логический 0» к числу разрядов m_{cn} , что не требует дополнительных аппаратных и временных затрат.

Время преобразования рассмотренного способа описывается выражением:

$$T_{np} = t_{x_{max}} + N_{cn} T_{cn}, \quad (8)$$

которое при $T_{cn} = t_{x_{max}}$ принимает вид:

$$T_{np} = (N_{cn} + 1) t_{x_{max}}. \quad (9)$$

Быстродействие предлагаемого способа преобразования (первого варианта) в отличие от известного [2, 3], работающего в режиме $t_{x_{max}} < T_{cm}$, повышается в два раза, так как рециркулирующие старт- и стоп-импульсы сближаются с дискретностью, равной 2τ , что, соответственно, уменьшает в два раза число их рециркуляций.

Структурный способ повышения быстродействия рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП в два раза в режиме $t_{x_{max}} > T_{cm}$ (второй вариант)

В данном варианте весь процесс рециркуляционного преобразования, описываемый $m = \log_2(N + 1)$ разрядами ПДК, осуществляется в два этапа. На первом этапе, назовем его преобразование «грубо», с дискретностью не более $T_{cm} = T < t_{x_{max}}$, определяется группа старших разрядов m_r , а затем на втором этапе, назовем его преобразование «точно», определяется с дискретностью $\tau \ll T_{cm}$ группа младших разрядов m_t . Для обеспечения работоспособности необходимо выполнение условий $m = m_r + m_t$, число уровней дискретизации $N = t_{x_{max}} / \tau$ и подсчитывание числа рециркуляций n_{cm}^* старт-импульса за время действия преобразуемого ВИ длительностью t_x (преобразование «грубо») и числа рециркуляций n_{cn}^* стоп-импульса со времени его ввода в стоп-рециркулятор и до времени совпадения рециркулирующих старт- и стоп-импульсов (преобразование «точно»). Причем во время преобразования «грубо» длительность рециркулирующего старт-импульса оставляют неизменной, а при $t > t_x$ (при преобразовании «точно») в каждой из рециркуляций длительность старт-импульса t_{cm} монотонно расширяют на значение τ . В то же время длительность стоп-импульса t_{cn} в процессе рециркуляций оставляют неизменной. Следует заметить, что при $t > t_x$

$$n_{cm}^{**} = n_{cm}^* \quad (10)$$

(n_{cm}^{**} – число рециркуляций старт-импульса).

Таким образом, за все время преобразования общее число рециркуляций старт-импульса $n_0 = n_{cm}^* + n_{cm}^{**}$.

Выражения (1) и (2) при $t_{x_{max}} > T_{cm}$ принимают вид, соответственно

$$f_{cm}^*(t) = f_{cm}^*(t) + f_{cm}^{**}(t), \quad (11)$$

где $f_{cm}^*(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^* T_{cm})$ и

$f_{cm}^{**}(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^{**} \tau + n_{cm}^{**} T_{cm})$ – импульсные последовательности, вырабатываемые в старт-рециркуляторе в процессе преобразования «грубо», и

$$f_{cn}(t) = f(t_x + t_{cn} + n_{cn}^* T_{cn}). \quad (12)$$

С учетом выражений (3), (5), (6), (10), длительность преобразуемого ВИ

$$t_x = n_{cm}^* T_{cm} + 2n_{cn}^* \tau. \quad (13)$$

Здесь первое и второе слагаемые представляют результаты преобразования «грубо» и «точно» с областью изменения $n_{cm}^* \in [1; N_{cm}^*]$ ($N_{cm}^* = t_{x_{max}} / T_{cm}$) и $n_{cn}^* \in [1; N_{cn}^*]$ ($N_{cn}^* = T_{cm} / \tau$), а $(N_{cm}^* + 1)(N_{cn}^* + 1) = (N + 1)$.

При $T_{cm} / \tau = Q$ длительность преобразуемого ВИ, описываемая выражением (13), принимает вид:

$$t_x = W\tau, \quad (14)$$

а цифровой результат преобразования $W = n_{cm}^* Q + 2n_{cn}^*$ определяется в арифметическо-логическом устройстве (АЛУ), что требует дополнительных аппаратурных и временных затрат.

Для исключения АЛУ и, следовательно, устранения дополнительных аппаратурных и временных затрат, а также сохранения однородности шкал отсчета преобразований «грубо» и «точно», необходимо выбирать Q кратным степени основания двоичной системы счисления, то есть $Q = 2^a$, причем целое число $m_T \geq a > 2$. В этом случае цифровой результат преобразования «грубо» $n_{cm}^* Q$ позиционно размещается в группе старших m_T разрядов, а цифровой результат преобразования «точно» $2n_{cn}^*$ – в группе младших разрядов m_T общего числа разрядов выходного кода m [5]. Получение значения $2n_{cn}^*$ осуществляется путем добавления младшего разряда со значением разряда «логический 0» в группу младших разрядов m_T , что также не требует дополнительных аппаратурных и временных затрат.

Время преобразования рассмотренного способа $T_{np}^* = t_{x_{max}} + N_{cn}^* T_{cn}$ или, учитывая выражение (8),

$$T_{np}^* = (N_{cn}^* + 1) t_{x_{max}}. \quad (15)$$

Быстродействие рассмотренного способа преобразования (второго варианта) в отличие от известного [2, 3], работающего в режиме $t_{x_{max}} > T_{cm}$, повышается в два раза, так как за время $t > t_x$ рециркулирующие старт- и стоп-импульсы сближаются с дискретностью, равной 2τ , что соответственно уменьшает в два раза число их рециркуляций.

Вместе с тем из сравнения выражений (9) и (15) следует повышение быстродействия в

$(N + 1) / (N_{cn}^* + 1) = (N_{cm}^* + 1)$ раз второго варианта по отношению к первому.

Структурный способ повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при $t_{x_{max}} < T_{cm}$

Для повышения надежности преобразования при одновременном сохранении быстродействия, для случая $t_{x_{max}} < T_{cm}$ представим выражение (1) в виде $f_{cm}^*(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^*(T_{cm} + \tau))$, а выражение (2) оставим в прежнем виде. Тогда, с учетом (3)–(5), длительность преобразуемого ВИ будет описываться выражением (7), но при этом операция расширения старт-импульса из процесса преобразования исключается, а период рециркуляции T_{cm} увеличивают на значение дискретности преобразования τ [6].

Структурный способ повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$

возможно реализовать в двух вариантах. В первом варианте во время $t = t_x$ (преобразования «грубо») выбирают период рециркуляции $T_{cm} = T$, а при $t > t_x$ (преобразование «точно») – $T_{cm} = T + \tau$. Тогда, представляя выражение (11) в виде

$$f_{cm}^*(t) = f_{cm}^*(t) + f(t_{cm} + n_{cm}^{**}(T + \tau))$$

и учитывая выражения (12), (3), (5), (10), значение длительности преобразуемого ВИ описывается выражением (13), но при этом операция расширения старт-импульса из процесса преобразования исключается. Во втором варианте за все время преобразования, то есть при $t = t_x$ и $t > t_x$, период рециркуляции выбирают как $T_{cm} = T + \tau$ и представляют выражение (11) в виде $f_{cm}^*(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^*(T + \tau))$. С учетом выражений (3), (12), (10) нетрудно показать, что длительность преобразуемого ВИ описывается также выражением (13), а определение значений n_{cm}^* и n_{cn}^* значительно упрощается (см. ниже раздел «Аппаратурная реализация способа повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$ »).

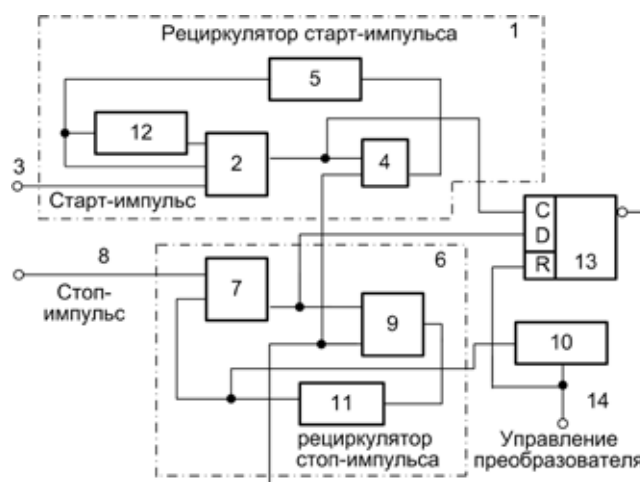


Рис. 1. Функциональная схема рециркуляционного нониусно-импульсного ВЦП при $t_x < T_{cm}$

Таким образом, повышение надежности преобразования при $t_{x_{max}} < T_{cm}$ и $t_{x_{max}} > T_{cm}$ заключается в исключении процесса расширения старт-импульса t_{cm} в каждой из рециркуляций и простом увеличении периода рециркуляции T_{cm} стоп-импульса на значение дискретности преобразования.

Аппаратурная реализация структурного способа повышения быстродействия рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП в два раза при $t_{x_{max}} < T_{cm}$ приведена на рисунке 1 и содержит рециркулятор 1 старт-импульса, состоящий из трехходовой схемы ИЛИ2, схемы И4, линии задержки 5, дополнительной линии задержки 12, и рециркулятор 6 стоп-импульса, состоящий из схемы ИЛИ7, схемы И9, линии задержки 11, а также D-триггер 13, счетчик импульсов 10 и шины 3, 8, 14 «Старт-импульс», «Стоп-импульс» и «Управление преобразователя».

Рассмотрим работу предлагаемого преобразователя.

Перед началом преобразования сигналом управления, подаваемым на шину 14 преобразователя, посредством D-триггера 13 осуществляют открытие рециркуляторов 1, 6 старт- и стоп-импульсов и установку счетчика импульсов 10 в состояние «логический 0» (исходное состояние).

Старт- и стоп-импульсы, соответствующие началу и концу преобразуемого ВИ длительностью t_x , вводятся через шину 3 «Старт-импульс» и шину 8 «Стоп-импульс» соответственно в рециркулятор 1 старт-импульса и в рециркулятор 6 стоп-импульса.

Старт- и стоп-импульсы должны иметь калиброванные длительности $t_{cm} > t_{p1} + \tau$ и $t_{cn} > t_{p2} + \tau$, где $t_{p1} = t_2 + t_4$, $t_{p2} = t_7 + t_9$ – суммарное время переключения логических элементов соответственно рециркулятора 1 старт-импульса (схема ИЛИ2 и схема И4) и рециркулятора 6 стоп-импульса (схема ИЛИ7 и схема И9), а τ задается временем задержки дополнительной линии задержки 12.

В процессе преобразования на выходе схемы ИЛИ2 рециркулятора 1 старт-импульса вырабатывается импульсная последовательность, описываемая выражением (1), где период рециркуляции $T_{cm} = t_5$ (t_5 – время задержки линии задержки 5), а старт-импульс в результате расширения имеет монотонно возрастающую длительность $t_{cm_i} = t_{cm} + i\tau$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N_{cn}$ – порядковый номер рециркуляций.

В то же время на выходе (выход линии задержки 11) рециркулятора 6 стоп-импульса формируется импульсная последовательность $f_{cn}(t)$ с периодом рециркуляции $T_{cn} = t_{11}$ (t_{11} – время задержки линии задержки 11), но при этом исходная длительность t_{cn} остается неизменной, то есть $t_{cm_i} = t_{cm}$.

Так как, согласно выражению (5),

$T_{cm} > T_{cn}$ на значение дискретности преобразования, то в каждой из рециркуляций импульсы t_{cm_i} на выходе рециркулятора 1 старт-импульса и импульсы t_{cn} на выходе рециркулятора 6 стоп-импульса, сближаются друг с другом по времени с дискретностью, равной 2τ . В момент совпадения импульсов t_{cm_i} и t_{cn} , момент выполнения равенства, описанного выражением (3), D-триггер 13 переключается по своему инверсному выходу и запрещает работу обоих рециркуляторов. Процесс рециркуляции в них прекращается, а число рециркуляций $n_{cn} = n_{cm}$ регистрируется счетчиком импульсов 10. При этом длительность преобразуемого ВИ (функция преобразования) рассмотренного преобразователя описывается выражением (7).

Аппаратурная реализация способа повышения быстродействия рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП в два раза при $t_{x_{max}} > T_{cm}$

На рисунке 2 приведена функциональная схема рециркуляционного нониусно-импульсного ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$, а на рисунке 3 – временные диаграммы его работы.

ВЦП содержит рециркуляторы старт-импульса и стоп-импульса, причем рециркулятор старт-импульса содержит схему ИЛИ1, первую схему И4, вторую схему И5, дополнительную линию задержки 6, третью схему И8, линию задержки 10 старт-импульса, а рециркулятор стоп-импульса содержит схему ИЛИ11, схему И13, линию задержки 15 стоп-импульса [7].

Рассмотрим работу преобразователя.

Перед началом преобразования сигналом управления, подаваемым на шину 16 «Управление» преобразователя, посредством D-триггера 9, третьей схемы И8 и схемы И13 осуществляется открытие рециркуляторов старт- и стоп-импульсов и установка первого 7 и второго 14 счетчиков импульсов в исходное состояние.

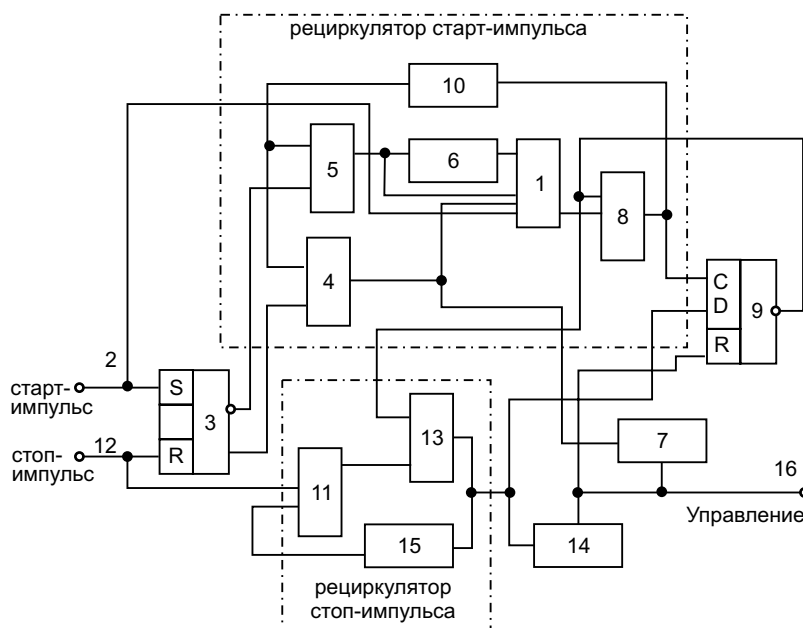


Рис. 2. Функциональная схема рециркуляционного нониусно-импульсного ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$

При поступлении старт-импульса RS-триггер 3 переключается, вторая схема И5 закрывается, а первая схема И4 открывается и в рециркуляторе старт-импульса начинается процесс рециркуляции старт-импульса.

Здесь старт- и стоп-импульсы, соответствующие началу и концу преобразуемого ВИ длительностью t_x , должны иметь калиброванные длительности, соответственно $t_{cm} > t_{p1} + \tau$ и $t_{cn} > t_{p2} + \tau$, где $t_{p1} = t_1 + t_{4,5} + t_8$, $t_{p2} = t_{11} + t_{13}$ – суммарное время переключения логических элементов соответственно рециркулятора старт-импульса (схема ИЛИ1, первая 4 или вторая 5 схемы И, схема И8) и рециркулятора стоп-импульса (схема ИЛИ11 и схема И13), а τ задается временем задержки дополнительной линии задержки б.

До момента поступления на шину 12 преобразователя стоп-импульса, на выходе третьей схемы И8 рециркулятора старт-импульса, вырабатывается импульсная последовательность $f_{cm}^*(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^* T_{cm})$ (см. рис. 3, диаграммы б, ж).

Период рециркуляции T_{cm} в нем задается временем задержки линии задержки 10 старт-импульса.

Первый счетчик импульсов 7 фиксирует число импульсов n_{cm}^* в последовательности $f_{cm}^*(t)$, заполнивших ВИ длительностью t_x (см. рис. 3, диаграмма ж) в результате преобразования «грубо».

С приходом на шину 12 стоп-импульса начинается преобразование «точно», RS-триггер 3 переключается (см. рис. 3, диаграмма д), первая схема И4 закрывается, а вторая схема И5 открывается. С этого момента времени ($t > t_x$) рециркулятор старт-импульсов вырабатывает импульсную последовательность $f_{cm}^{**}(t) = f(t_{cm} + n_{cm}^{**} \tau + n_{cm}^{**} T_{cm})$ с периодом также T_{cm} , но с монотонно возрастающей длительностью импульсов t_{cm} в каждой из рециркуляций, то есть $t_{cmi} = t_{cm} + i\tau$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N_{cm}^*$ – порядковый номер рециркуляций в рециркуляторе старт-импульса при $t > t_x$ (см. рис. 3, диаграмма б).

В то же время импульсная последовательность, вырабатываемая в стоп-рециркуляторе, описывается

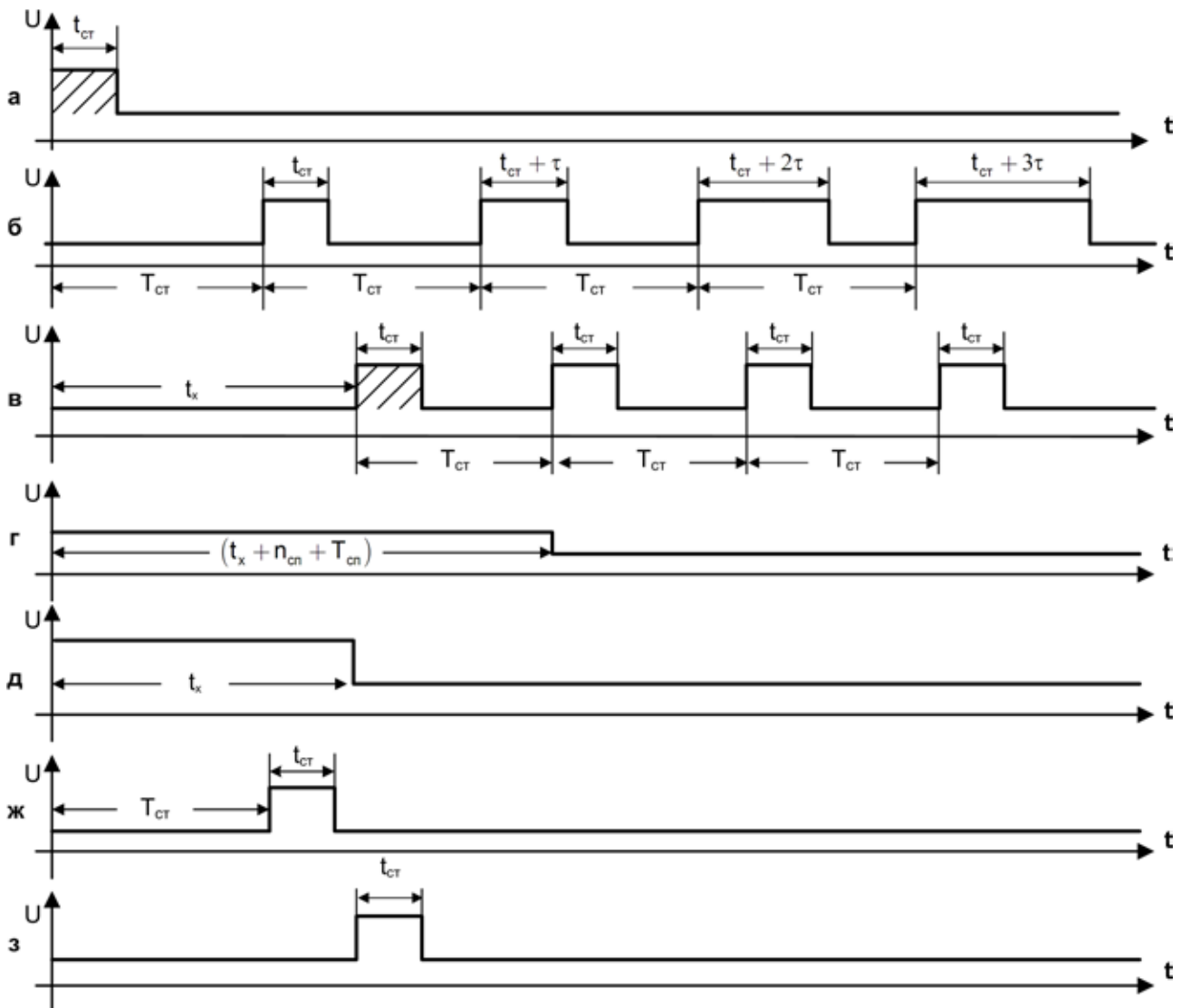


Рис. 3. Временные диаграммы работы рециркуляционного нониусно-импульсного ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$

выражением (12), в котором период рециркуляции T_{cn} задается временем задержки линии задержки 15, а исходная длительность стоп-импульса остается неизменной, то есть $t_{cni} = t_{cn}$ (см. рис. 3, диаграмма в).

Так как $T_{cm} = T_{cn} + \tau$, то в каждой из рециркуляций импульсы t_{cm} на выходе третьей схемы И8 и импульсы t_{cn} на выходе схемы И13 приближаются друг к другу по времени с дискретностью, равной 2τ до тех пор, пока через n_{cn}^* рециркуляций не совпадут по времени (фазе). В этот момент D-триггер 9 переключается по своему инверсному выходу и закрывает рециркуляторы. Процесс рециркуляции в них прекращается (см. рис. 3, диаграмма г), а число рециркуляций n_{cn}^* регистрируется вторым счетчиком импульсов 14 (см. рис. 3, диаграмма з).

При этом функция преобразования рассмотренного преобразователя описывается выражением (13).

Аппаратурная реализация способа повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при $t_{x_{max}} < T_{cm}$ реализуется путем исключения из рециркуляционного нониусно-импульсного ПВК (рис. 1.) дополнительной линии задержки 12, применения двухвходовой схемы ИЛИ2 (вместо трехвходовой) и увеличения времени задержки линии задержки 5 на значение дискретности преобразования.

Аппаратурная реализация способа повышения надежности преобразования рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП при $t_{x_{max}} > T_{cm}$ осуществляется двумя вариантами за счет устранения и применения в рециркуляционном нониусно-импульсном ВЦП, рассмотренным на рисунке 2, следующих элементов. В первом варианте – дополнительной линии задержки 6 и использования трехвходовой схемы ИЛИ1 (вместо четырехвходовой), а во втором – исключения первой схемы И4, второй схемы И5, дополнительной линии задержки 6 и использования двухвходовой схемы ИЛИ1 (вместо четырехвходовой). При этом в обоих вариантах время задержки линии задержки 10 старт-импульса увеличивается на значение дискретности преобразования.

Возможности аппаратурной реализации рассмотренных способов на современной элементной базе заключаются в использовании для построения как логической части, так и линий задержки программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA, например EP2C20F484C7N фирмы Altera. В этом случае линии задержки представляют собой цифровые линии задержки (ЦЛЗ) (в зарубежной литературе DDL – Digital Delay Line), и каждая выполняется в виде последовательной цепи из логических вентелей, входящих в состав ПЛИС. Выполнение рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП полностью на ПЛИС позволяет обеспечить компактность и существенно уменьшить аппаратурные и временные затраты на их настройку. Вместе с тем приведенные выше схемотехнические выполнения рассмотренных способов преобразования позволяют осуществлять их техническую реализацию в виде монолитных интегральных схем.

Рекомендации по применению рассмотренных способов повышения качества рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП.

Первый вариант способа повышения быстродействия целесообразно применять в качестве малоразрядных, с информационной емкостью не более 10 разрядов ПДК, рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП, а также в качестве интерполяторов в счетно-импульсных ПВК для уменьшения погрешности дискретизации, связанной с неопределенностью поступления преобразуемого ВИ относительно счетной последовательности стабильной частоты следования и конечным значением быстродействия счетчика импульсов, регистрирующего число импульсов счетной последовательности за время действия преобразуемого ВИ. Так как временное разрешение интегральных счетчиков импульсов не превышает $2\div 4$ нс и не позволяет прямым счетно-импульсным способом обеспечить дискретность преобразования $\tau \ll 1$ нс. В то же время второй вариант способа повышения быстродействия преобразования рекомендуется использовать в самостоятельных рециркуляционных нониусно-импульсных ВЦП с информационной емкостью в 20 и более разрядов ПДК.

Выводы

Рассмотренные способы повышения быстродействия и надежности (качества) преобразования с дискретностью преобразования в десятки пикосекунд обеспечиваются структурным способом, что не требуют дополнительных аппаратурных затрат и повышенного быстродействия от используемой элементной базы и могут быть технически исполнены в виде интегральных микросхем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковтун А.К., Шкуро А.Н. Принципы построения цифровых измерителей интервалов времени (обзор) // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 1. – С. 7–14.
2. Мелешко Е.А. Быстродействующая импульсная электроника. – М.: Физматлит, 2007. – 320 с.
3. Чулков В.А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. – М.: Физматлит, 2010. – 324 с.
4. Пат. 2464612 Российская Федерация, МПК7 G 04F 10/04. Способ рециркуляционно-нониусного преобразования время-код / Абрамов Ю.Г.; заявитель и патентообладатель Абрамов Ю.Г. – № 2011114729/28; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29.
5. Абрамов Г.Н., Абрамов Ю.Г. Улучшение технических характеристик рециркуляционных преобразователей время-код с интерполяторами хронотронного типа // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 2 (28). – С. 66–73.
6. Пат. 2494430 Российская Федерация, МПК7 G 04F 10/04. Способ рециркуляционно-нониусного преобразования время-код / Абрамов Ю.Г.; заявитель и патентообладатель Абрамов Ю.Г. – № 2012113039/28; заявл. 03.04.2012.; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.

7. Пат. 2498384 Российская Федерация, МПК7 G 04F 10/04. Широкодиапазонный нониусный рециркуляционный преобразователь временных интервалов в цифровой код / Абрамов Ю.Г.; заявитель и патентообладатель Абрамов Ю.Г. – №2012122749/28 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31.

REFERENCES

1. Kovtun A.K., Shkuro A.N. Printsipy postroyeniya tsifrovyykh izmeriteley intervalov vremeni (obzor) [Principles for Building Digital Meters of Time Slots (review)]. *Pribery i tekhnika eksperimenta* [Devices and Experimental Technique], 1973, No. 1, pp. 7–14.

2. Meleshko Ye.A. *Bystrodeystvuyushchaya impulsnaya elektronika* [Fast Pulse Electronics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 320 p.

3. Chulkov V.A. *Interpoliruyushchiye ustroystva sinkhronizatsii i preobrazovately informatsii* [Interpolating Synchronization Devices and Data Converters]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 324 p.

4. Russian Federation Patent 2464612, Int.Cl.: G 04F 10/04. Sposob retsirkulyatsionno-noniussnogo preobrazovaniya vremya-kod [Method for Recirculation-Nonius Time-to-Digital Conversion]. Inventor: Abramov Yu.G. Applicant and proprietor: Abramov Yu.G. Application:

2011114729/28. Date of filing: April 14, 2011. Date of publication: October 20, 2012. Bull. No. 29.

5. Abramov G.N., Abramov Yu.G. Uluchsheniye tekhnicheskikh kharakteristik retsirkulyatsionnykh preobrazovateley vremya-kod s interpolatorami khronotronnogo tipa [Improvement of Technical Characteristics of Time-Code Recycle Transformers with Chronotronic Interpolators]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2012, No. 2 (28), pp. 66–73.

6. Russian Federation Patent 2494430, Int.Cl.: G 04F 10/04. Sposob retsirkulyatsionno-noniussnogo preobrazovaniya vremya-kod [Method for Recirculation-Nonius Time-to-Digital Conversion]. Inventor: Abramov Yu.G. Applicant and proprietor: Abramov Yu.G. Application: 2012113039/28. Date of filing: April 03, 2012. Date of publication: September 27, 2013. Bull. No. 27.

7. Russian Federation Patent 2498384, Int.Cl.: G 04F 10/04. Shirokodiapazonnyy noniussnyy retsirkulyatsionnyy preobrazovatel vremennykh intervalov v tsifrovoy kod [Wide-Range Vernier Recirculating Converter of Time Intervals to Digital Code]. Inventor: Abramov Yu.G. Applicant and proprietor: Abramov Yu.G. Application: 2012122749/28. Date of filing: June 01, 2012. Date of publication: November 10, 2013. Bull. No. 31.