

УДК 621.317.3

*А. В. Князьков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов***ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ В КОД¹***A. V. Knayzkov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov***TIME INTERVAL CONVERTER IN CODE**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрен преобразователь интервалов времени в код, предназначенный для построения измерителей интервалов времени, например длительностей фронта и спада импульсных сигналов при определении максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей. **Материалы и методы.** Исследование преобразователя выполнено с применением специально разработанного стенда с двумя синхронизированными DDS-генераторами AD9851. **Результаты.** Приведены структурная схема стенда для исследования преобразователя интервалов времени в код TDC7200, методика исследования преобразователя интервалов времени в код. Исследование преобразователя интервалов времени в код TDC7200 показало, что после коррекции выявленной аддитивной составляющей погрешности измерений относительная погрешность измерений интервалов времени преобразователем TDC7200 по сравнению с частотомером ЧЗ-64/1 не превышает 1,2 % в диапазоне от 0,2 до 10,0 мкс. **Выводы.** Подтверждена возможность использования преобразователя интервала времени в код TDC7200 для построения измерителей малых интервалов времени и измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ.

A b s t r a c t. Background. The converter of time intervals in code designed for constructing time interval meters, for example, front durations and decay times of pulse signals in determining the maximum rates of rise and fall of the output voltage of operational amplifiers. **Materials and methods.** The converter was tested using a specially designed system with two synchronized DDS-generators AD9851. **Results.** Structural diagram of the stand for the research of the time interval converter in the code TDC7200, the procedure for examining the time interval converter in the code are given. The study of the time interval converter in the code TDC7200 showed that after correcting the detected additive component of the measurement error, the relative error in the measurement of the time intervals by the TDC7200 converter in comparison with the frequency counter of CH3-64/1 does not exceed 1.2 % in the range from 0.2 μ s to 10.0 μ s. **Conclusions.** The possibility of using a time interval converter in the code TDC7200 for constructing meters of small time intervals and a meter for the rate of rise (fall) of the output voltage of the op-amp

К л ю ч е в ы е с л о в а: преобразователь интервалов времени в код, исследование, стенд, операционный усилитель, скорость нарастания выходного напряжения.

Key words: converter of time intervals in code, research, stand, operational amplifier, slew rate.

¹ Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

Введение

Задача измерения малых (порядка 1 мкс) интервалов времени относится к числу технически сложных задач измерительной техники. С такой проблемой приходится сталкиваться при измерении длительностей фронта и спада импульсных сигналов, например, при определении максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения операционных усилителей (ОУ) [1]. В ряде работ, например [2, 3], с целью упрощения цифровой части измерителей малых интервалов времени применяются промежуточные аналоговые преобразования. Например, при измерении скорости нарастания выходного напряжения ОУ используется следующая последовательность операций: скорость нарастания напряжения – интервал времени – постоянное напряжение – цифровой код. Недостатками такого решения являются: сложность настройки аналоговой части схемы; накопление погрешностей при последовательном выполнении нескольких преобразований; низкое быстродействие, обусловленное наличием измерителей среднего значения напряжения, обладающих большим временем установления выходного постоянного напряжения. Поэтому можно считать актуальной задачу разработки простых в реализации и настройке, быстродействующих и точных цифровых преобразователей малых интервалов времени в код.

Стенд для исследования преобразователя интервалов времени в код

Как было отмечено выше, повышение быстродействия измерителей интервалов времени может быть достигнуто за счет отказа от промежуточных аналоговых и аналого-цифровых преобразований. Повышению быстродействия цифровых измерителей интервалов времени способствует замена совокупности цифровых схем, последовательно выполняющих ряд преобразований сигналов, на один программно управляемый интегральный модуль. При этом уменьшаются наводки и паразитные связи за счет минимальной длины межкаскадных соединений, каскады имеют одинаковые температурные режимы и т.д. Для построения измерителя малых интервалов времени предложено использовать интегральный преобразователь интервала времени в код TDC7200 фирмы Texas Instruments [4].

С целью исследования данного преобразователя разработан стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1. Подлежащие измерению интервалы времени формируются с помощью двух синхронизированных DDS-генераторов AD9851 [5]. Результаты измерения интервалов времени, полученные с помощью преобразователя TDC7200, сравниваются с показаниями электронно-счетного частотомера ЧЗ-64/1 [6].

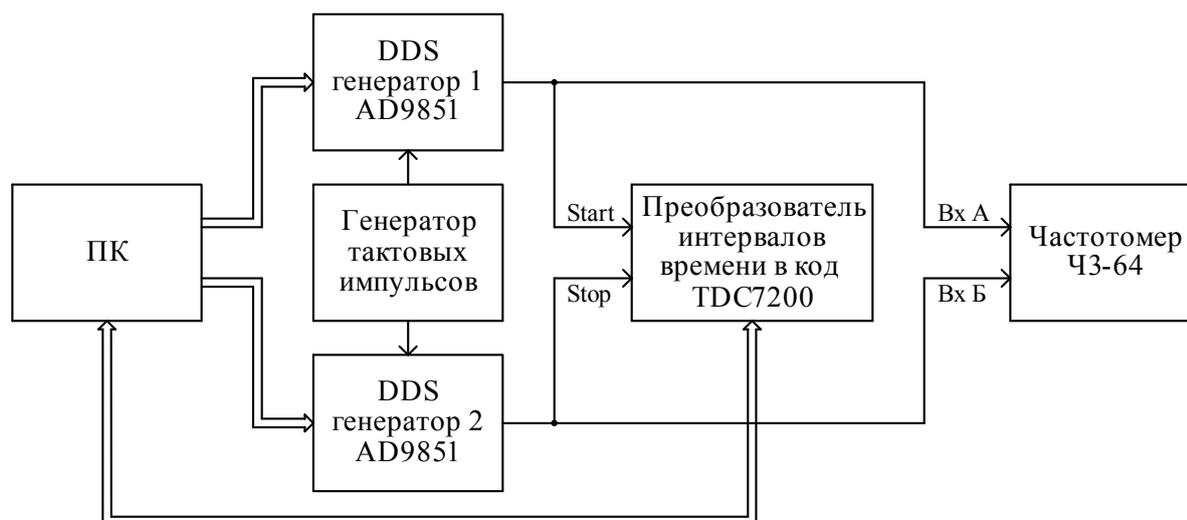


Рис. 1. Структурная схема стенда для исследования преобразователя интервалов времени в код TDC7200

Синхронизация первого и второго DDS-генераторов 1 и 2 осуществляется тактовыми сигналами высокостабильного генератора тактовых импульсов. Для формирования прямо-

угольных импульсов на выходах DDS-генераторов используются встроенные компараторы. Путем программного изменения фазового сдвига между выходными сигналами DDS-генераторов формируются две последовательности прямоугольных импульсов одной частоты с задаваемой временной задержкой между ними, которая выступает в качестве задаваемого тестового интервала времени:

$$t = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{360} T, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 – фазы (в градусах) выходных сигналов генераторов 1 и 2; T – период этих сигналов.

С целью приближения условий проводимого эксперимента к условиям эксплуатации преобразователя интервала времени в код TDC7200 в составе измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ следует выбирать частоту следования прямоугольных импульсов достаточно высокой (как минимум, несколько сотен килогерц). Этим будет обеспечено высокое быстродействие измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ, даже при усреднении результатов нескольких десятков или сотен измерений. Максимальная частота следования прямоугольных импульсов, которые могут быть сформированы встроенным компаратором, составляет 1 МГц, а минимальный фазовый сдвиг, который может быть задан у DDS-генераторов AD9851 [5], составляет $11,25^\circ$. Подставляя эти значения в (1), получим, что на частоте 1 МГц минимальный интервал времени, который можно сформировать с помощью двух DDS-генераторов AD9851, составляет:

$$t_{\min} = \frac{11,25}{360} \cdot 10^{-6} = 31,25 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 0,03125 \text{ мкс}.$$

При амплитуде выходного напряжения ОУ 5 В размах напряжения между уровнями 0,1 и 0,9 от выходного напряжения составляет 4 В. Тогда минимальный измеряемый интервал времени 0,03125 мкс соответствует максимальной скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ 128 В/мкс.

Таким образом, потенциальные возможности разработанного стенда вполне соответствуют задачам, решаемым при измерении длительностей фронта и спада прямоугольных импульсов на выходе ОУ при определении максимальных скоростей нарастания и спада их выходного напряжения.

Методика исследования преобразователя интервалов времени в код

В разработанном стенде (рис. 1) одноименные фронты импульсов на выходах генераторов 1 и 2 являются началом и концом формируемого интервала времени соответственно. Генераторы имеют комплементарные выходы, что позволяет формировать временные интервалы как по фронтам, так и по спадам импульсов. Первый генератор формирует стартовую импульсную последовательность, означающую начало интервала времени, второй, соответственно, стоповую, означающую конец интервала.

Методика исследования:

1. Задаются интервалы времени от 0,2 до 1,0 мкс с шагом 0,1 мкс, затем от 1,0 до 10,0 мкс с шагом 1 мкс. Для этого в соответствии с формулой (1) подбираются значения фазового сдвига ($\varphi_1 - \varphi_2$) и частоты (периода T), позволяющие получить значения временной задержки t , близкие к требуемым интервалам времени. Учитывая дискретность задания фазовых сдвигов, можно говорить только о близости значений получаемых интервалов времени к требуемым значениям.

2. Компьютерной программой, управляющей работой стенда, для DDS-генераторов формируются входные коды. На выходах генераторов формируются две последовательности прямоугольных импульсов одной частоты с задаваемой временной задержкой между ними. Интервалы времени, соответствующие этой временной задержке, измеряются преобразователем TDC7200 и частотомером ЧЗ-64/1 при запуске этих устройств по фронту импульсов.

3. С целью выявления преимуществ (если таковые имеются) каждого из способов запуска исследуемого преобразователя проводится вторая серия измерений при запуске устройств по спаду импульсов.

4. Проводится анализ результатов измерений с целью выявления аддитивной составляющей абсолютной погрешности измерений преобразователем TDC7200 по сравнению с частотомером ЧЗ-64/1, принимаемым в данном случае за рабочий эталон. Проводится коррекция погрешности измерений, после чего определяется относительная погрешность измерений интервалов времени преобразователем TDC7200 по сравнению с частотомером ЧЗ-64/1. При обработке результатов эксперимента с запуском устройств по фронту импульсов применена коррекция аддитивной составляющей абсолютной погрешности 0,03 мкс, а в эксперименте с запуском по спаду импульсов – коррекция 0,01 мкс.

Исследование преобразователя интервалов времени в код TDC7200 показало, что после коррекции выявленной аддитивной составляющей погрешности измерений относительная погрешность измерений интервалов времени преобразователем TDC7200 по сравнению с частотомером ЧЗ-64/1 не превышает 1,2 % в диапазоне от 0,2 мкс до 10,0 мкс. Это позволяет сделать вывод о возможности использования преобразователя интервала времени в код TDC7200 для построения измерителей малых интервалов времени и измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ.

Применение преобразователя интервала времени в код при построении измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ

Предложена структура измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ, построенного с использованием цифрового преобразователя интервалов времени в код TDC7200 (рис. 2).

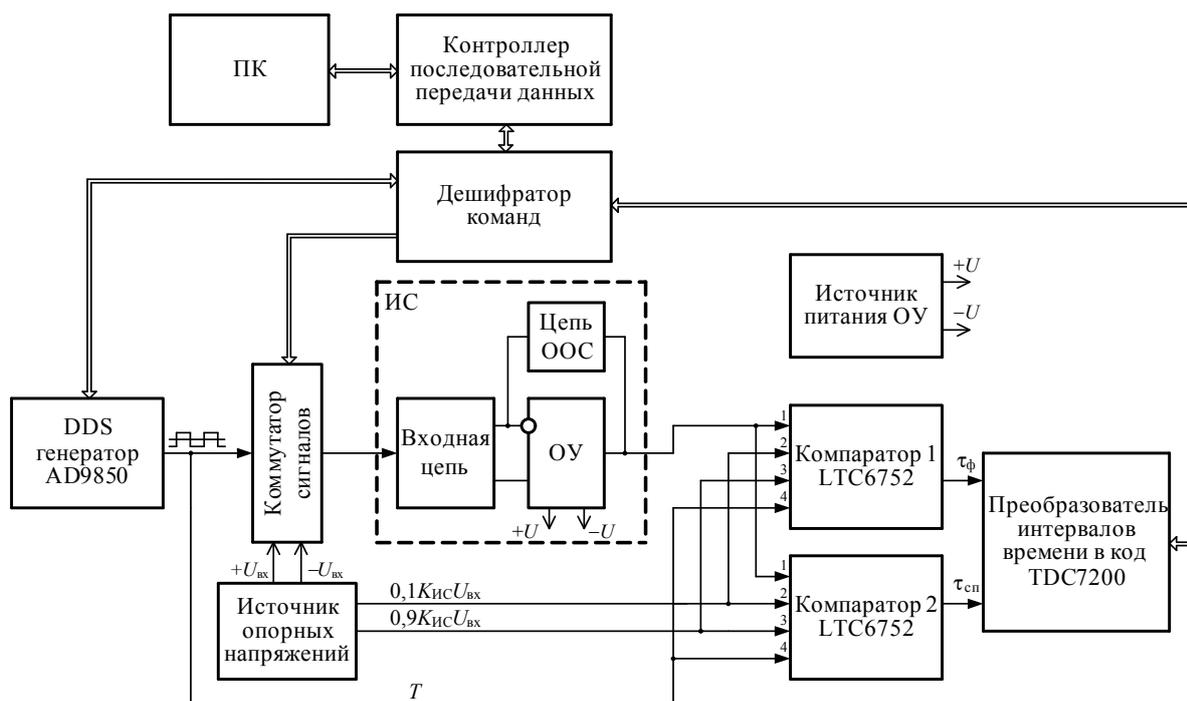


Рис. 2. Структурная схема измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ с использованием преобразователя TDC7200

Исследуемый ОУ включается в состав измерительной схемы с коэффициентом усиления $K_{ИС}$. На вход измерительной схемы поступает напряжение $U_{вх}(t)$ в виде последовательности однополярных или двухполярных прямоугольных импульсов с амплитудой $U_{вх}$ и периодом следования T . Импульсы формируются путем коммутации постоянных опорных напряжений $U_{вх}$ и $-U_{вх}$ с помощью коммутатора, управляемого выходным импульсным сигналом DDS-генератора AD9850 [7]. Использование DDS-генератора обусловлено тем, что данная структура должна интегрироваться в состав многофункционального аппаратно-программного ком-

плекса, измеряющего все динамические параметры ОУ. Поэтому генератор должен быть универсальным и программно управляемым, формировать не только импульсные, но и синусоидальные сигналы. При построении самостоятельного прибора, измеряющего только скорости нарастания и спада выходного напряжения ОУ, можно использовать простейший генератор импульсов.

Компараторы напряжений 1 и 2 осуществляют сравнение выходного напряжения измерительной схемы $U_{\text{вых}}(t)$ с установленными пороговыми уровнями $U_{\text{пор1}} = 0,1K_{\text{ИС}}U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{пор2}} = 0,9K_{\text{ИС}}U_{\text{вх}}$, в результате чего на выходах компараторов формируются импульсы с длительностями, равными соответственно времени нарастания τ_{ϕ} и времени спада $\tau_{\text{сп}}$ между уровнями 0,1 и 0,9 выходного напряжения ОУ. Используются быстродействующие компараторы LTC6752 [8]. Преобразователь TDC7200 полученные интервалы времени преобразует в коды, поступающие на обработку с использованием программного обеспечения, установленного на персональном компьютере.

Работой измерителя управляет персональный компьютер с программным обеспечением, разработанным в среде LabVIEW [9]. Формирование команд, управляющих аппаратной частью измерителя, и сбор измерительной информации осуществляется с помощью контроллера последовательной передачи данных и дешифратора команд. Для обеспечения высокого быстродействия измерителя контроллер последовательной передачи данных и дешифратор команд рекомендуется строить на основе программируемой платформы NI myRIO-1900 фирмы National Instruments [10].

Заключение

Подтверждена возможность применения преобразователя интервала времени в код TDC7200 для построения измерителей малых интервалов времени и измерителя скорости нарастания (спада) выходного напряжения ОУ.

Библиографический список

1. Нефедьев, Д. И. Исследование преобразователя скорости нарастания выходного напряжения операционных усилителей в интервал времени / Д. И. Нефедьев, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 13–20.
2. Сапунов, Е. В. Измерители динамических параметров операционных усилителей / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
3. Сапунов, Е. В. Преобразование интервала времени в постоянное напряжение при измерении скорости нарастания выходного напряжения операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 248–251.
4. TDC7200 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications in LIDAR, Magnetostrictive and Flow Meters. – Texas Instruments Incorporated, 2015. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tdc7200.pdf>.
5. AD9851. CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer. – Analog Devices, Inc., 2004. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9851.pdf>.
6. Частотомер электронно-счетный ЧЗ-64/1. Технические данные. – URL: <http://www.prist.ru/produces/pdf/ch3-64.pdf>.
7. AD9850 CMOS 125 MHz Complete DDS Synthesizer. – Analog Devices, Inc., 2004. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9850.pdf>.
8. LTC6752. 280MHz, 2.9ns Comparator Family with Rail-to-Rail Inputs and CMOS Outputs. – Linear Technology Corporation, 2014. – URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6752fb.pdf>.
9. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис, Дж. Кринг. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 904 с.
10. NI myRIO-1900. User Guide and Specifications. – National Instruments, 2013. – URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>

Князьков Александр Владимирович

инженер,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Knyaz'kov Aleksandr Vladimirovich

engineer,
sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

инженер,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Sapunov Evgeniy Vladimirovich

engineer,
sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Князьков, А. В.

Преобразователь интервалов времени в код / А. В. Князьков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 14–19.