

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION

УДК 681.2

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-4-0-9

Бражников А.М.  
Бражникова А.М.  
Забержинский Б.Э.

### О ПРЕЦИЗИОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО КОДА В НАПРЯЖЕНИЕ

Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, д. 244, г. Самара, 443100, Россия  
e-mail: [brazhnikova\\_98@mail.ru](mailto:brazhnikova_98@mail.ru), [zab.borislav@gmail.com](mailto:zab.borislav@gmail.com)

#### Аннотация

В статье изложена разработка высокоточного измерительного преобразователя сигналов широтно-импульсной модуляции в постоянное напряжение. Приводится обзор существующих типов преобразователей, анализируются их достоинства и недостатки. Обосновывается необходимость создания нового преобразователя. Предлагаемая схема устройства позволяет применять его в ряде специфических случаев, к примеру, для низкочастотных сигналов (вплоть до одиночных импульсов), а также для ШИМ с малой скважностью, без потери точности и разрешающей способности. В основу положен принцип заполнения импульса входного сигнала высокочастотными импульсами тактового генератора, последующим их подсчётом и преобразованием числа импульсов в напряжение посредством цифро-аналогового преобразователя с параллельным входом (резистивной матрице). В статье подробно рассмотрена работа преобразователя на примере структурной схемы, а также приведена его принципиальная электрическая схема, которая была протестирована средствами программного пакета Multisim. После проверки принципов работы преобразователя был собран его прототип. Сборка осуществлялась из готовых микросхем: счётчиков, регистров, элементов стандартной логики. Приводится описание его работы и характеристики, а также указываются отличительные особенности, в числе которых регулировка частоты тактового генератора, позволяющая контролировать заполнение входных импульсов отсчётами генератора, счетными импульсами независимо от частоты ШИМ. Это обеспечивает возможность применения преобразователя в обозначенных случаях. В заключение приведен расчёт погрешности. Среди факторов, оказывающих влияние на точность, выделены разрядность ЦАП, а также максимальная частота работы тактового генератора. Основным фактором, влияющим на нелинейность преобразователя, – разброс номиналов компонентов в резистивной матрице. Разработанная схема устройства отличается простотой, стабильностью работы, средствами программируемых логических интегральных микросхем (ПЛИС), что открывает широкие возможности по её внедрению в различные конструкции, где требуется с высокой точностью и скоростью осуществлять преобразование ШИМ сигнала в постоянное напряжение.

**Ключевые слова:** цифро-аналоговый преобразователь; широтно-импульсная модуляция; измерительный преобразователь; резистивная матрица; счётчики; микросхемы стандартной логики.

UDC 681.2

**Brazhnikov A.M.  
Brazhnikova A.M.  
Zaberzhinsky B.E.**

**ABOUT PRECISION DIGITAL-ANALOG CONVERTER  
(PWM-VOLTAGE)**

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St., 443100, Samara, Russia  
*e-mail: brazhnikova\_98@mail.ru, zab.borislav@gmail.com*

**Annotation**

The article describes the process of developing a high-precision measuring Converter of pulse-width modulation (PWM) signals into a constant voltage. The review of existing types of converters is given, their advantages and disadvantages are analyzed. The necessity of creating a new Converter is substantiated. The proposed scheme of the device allows it to be used in a number of specific cases, for example, for low-frequency signals (up to single pulses), as well as for PWM with low duty cycle, without loss of accuracy and resolution. The basis is the principle of filling the input pulse with high-frequency pulses of the clock generator, their subsequent calculation and conversion of the number of pulses into voltage by means of a digital-analog Converter with a parallel input (resistive matrix). The article describes in detail the operation of the Converter (block diagram), as well as its schematic diagram, which was tested by means of the software package Multisim. After checking the principles of operation of the Converter, its prototype was assembled. Assembly was carried out from ready chips: counters, registers, elements of standard logic. The description of its operation and characteristics are given, the distinctive features are indicated, including the frequency control of the clock generator, which allows controlling the process of filling the input pulses with the generator counts, regardless of the PWM frequency. This makes it possible to use the transducer in the above cases. In conclusion, the error calculation is given. Among the factors that affect the accuracy of the allocated bit width of the DAC, as well as the maximum frequency of the clock. The main factor affecting the linearity of the transducer – variation of the values of the components in the resistive matrix. The developed scheme of the device is simple, stable, repeatable means of programmable logic integrated circuits (FPGA), which opens up opportunities for its implementation in a variety of designs, which requires high accuracy and speed to convert PWM signal into DC voltage.

**Keywords:** digital-analog converter; pulse-width modulation; measuring converter; resistive matrix; counters; standard logic chips.

Современная электроника строится на основе цифровых схем. Однако, в некоторых задачах автоматического управления находят применение аналоговые сигналы. Для того чтобы согласовать работу микропроцессорного устройства и аналоговой схемы, необходим специальный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). На его вход информация подаётся по определённом протоколу (цифровому), с выхода снимается сигнал напряжения или тока. Разновидностью цифрового сигнала является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Она получила широкое распространение благодаря простоте формированию и передачи ШИМ (требуется всего одна линия).

Принцип широтно-импульсной модуляции заключается в постоянной импульсной модуляции. Длительность импульсов и их амплитуда сохраняются неизменными.

В частности, такой сигнал применяется в системах радиуправления моделями. Он используется для передачи информации от контроллера (приёмника) к электронике, управляющей исполнительными устройствами (сервоприводами и регуляторами скорости). Особенности ШИМ в данном случае являются низкая частота работы (50-70Гц), а также малая скважность (отношение длительности сигнала к его периоду), колеблющаяся от 5% до 15% [2].

В частности, такой сигнал применяется в системах радиуправления моделями. Он используется для передачи информации от контроллера (приёмника) к электронике, управляющей исполнительными устройствами (сервоприводами и регуляторами скорости). Особенности ШИМ в данном случае являются низкая частота работы (50-70 Гц), а также малая скважность (отношение длительности сигнала к его периоду), колеблющаяся от 5% до 15% [2].

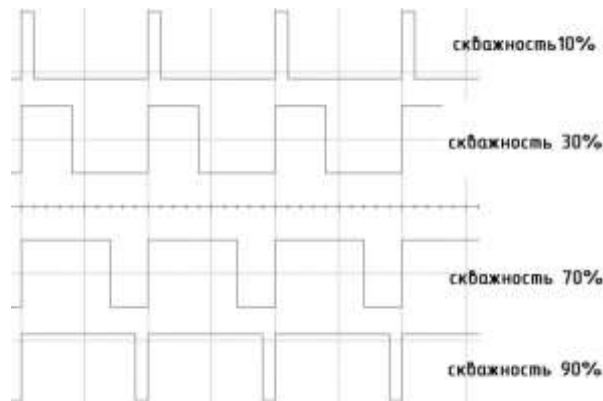


Рис. 1. Форма сигнала ШИМ  
Fig. 1. PWM waveform

В частности, такой сигнал применяется в системах радиоуправления моделями. Он используется для передачи информации от контроллера (приёмника) к электронике, управляющей исполнительными устройствами (сервоприводами и регуляторами скорости). Особенности ШИМ в данном случае являются низкая частота работы (50-70 Гц), а также малая скважность (отношение длительности сигнала к его периоду), колеблющаяся от 5% до 15% [2].

Один из способов преобразования ШИМ в постоянное напряжение является использование интегрирующей RC цепочки (фильтра низких частот). Этот метод является наиболее простым, его реализация требует минимального количества компонентов, расчёт параметров цепочки также не представляет затруднений. Однако при детальном рассмотрении выявляется ряд недостатков, ограничивающих область применения метода. Один из факторов – наличие пульсаций напряжения на выходе, которые связаны с процессами заряда/разряда конденсатора, при малых значениях сопротивления и ёмкости амплитуда пульсаций может достигать значительных величин. При попытке увеличить постоянную времени цепочки возникает новая проблема – увеличивается длительность переходного процесса. При мгновенном изменении скважности входного сигнала напряжение на выходе схемы изменяется крайне медленно. В некоторых случаях такая задержка неприемлема. Ещё одним недостатком интегрирующей цепи: её выходное сопротивление фактически равно сопротивлению резистора (пренебрегаем сопротивлением конденсатора на высоких частотах), которое может достигать больших значений, если, к примеру, мы будем пытаться увеличить постоянную времени за счёт увеличения номинала резистора. Получается, что к выходу такой схемы можно подключать только высокоимпедансную нагрузку [3,4,5].

Разумеется, используя схемотехнические приёмы и дополнительные компоненты можно несколько улучшить параметры схемы. На основе операционных усилителей (ОУ) возможно создать более эффективные фильтры (в том числе и высокого порядка). Такие решения лежат в основе промышленных преобразователей, которые нашли применение в качестве дополнения к программируемым логическим контроллерам. Однако, точность преобразования оставляет желать лучшего, область, где применяются такие модули, не предъявляет высоких требований к этому параметру [6,7].

Не случайно фирма LinearTechnology выпускает целую серию микросхем, осуществляющих преобразование ШИМ сигнала в постоянное напряжение [8]. Эти микросхемы отличаются выдающимися характеристиками (в сравнении с вышеприведённым методом). Во-первых, точность преобразования составляет 8, 10 или 12 бит (в зависимости от модели), частота входного сигнала может колебаться от 30 до 6,5 кГц. Во-вторых, микросхема имеет четыре независимых канала преобразования и внутренний источник опорного напряжения. В-третьих, время преобразования сокращено до минимума и фактически равно длительности одного импульса входного сигнала. Несмотря на все преимущества этой микросхемы, ограниченное количество настраиваемых параметров не позволяет применять её в ряде случаев, например, когда скважность ШИМ изменяется в малых пределах, как в описанной выше системе радиоуправления моделями. В

результате, вместо обозначенных 8 или 12 бит, может быть использовано только половина разрядов и меньше.

Ещё один способ преобразовать ШИМ в постоянное напряжение – использовать микроконтроллер. В составе большинства современных микросхем этого вида присутствует всё необходимое (таймеры, счётчики, внешние прерывания, ЦАП) для разработки преобразователей с широким спектром настраиваемых параметров. Однако, быстродействие контроллеров накладывает ограничения на точность, количество каналов, разрядность преобразователя. Поэтому данный метод не получил широкого распространения.

Для решения задачи преобразования низкочастотного ШИМ сигнала в постоянное однополярное напряжение было разработано, собрано и протестировано устройство на логических элементах. Точность преобразования составляет 8 бит, время преобразования (периодичность обновления данных на выходе) равна периоду входного сигнала и может быть сколь угодно большим.

Структурная схема устройства приведена на рисунке 2.

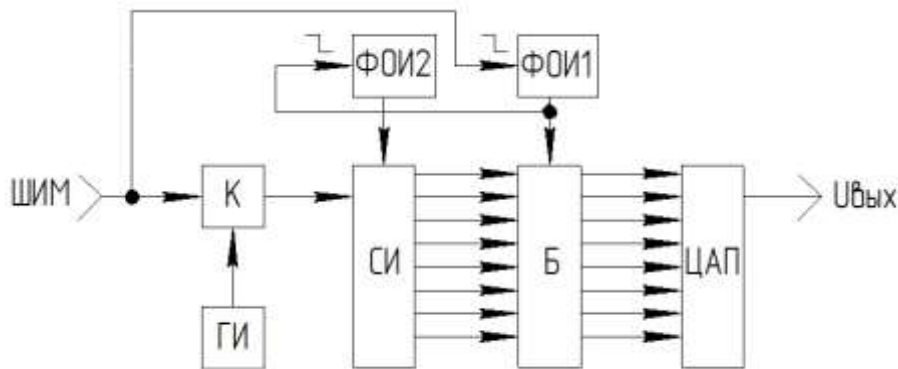


Рис. 2. Структурная схема преобразователя  
Fig. 2. Diagram of the structure of the converter

Прямоугольный сигнал с генератора тактовых импульсов (ГИ) поступает на один из входов ключа (К), где он модулируется импульсами ШИМ. Таким образом, на выходе ключа количество импульсов пропорционально длительности импульса ШИМ. Модулированный сигнал поступает на счётчик импульсов (СИ), на выходе которого получается двоичный код, соответствующий количеству отсчётов, пришедших на вход. Необходимо отметить, что обновление значений на выходе счётчика происходит с приходом каждого нового импульса (сколь угодно малой частоты). Если подать такой сигнал на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), то на выходе устройства получится подобие пилообразного сигнала. Необходимо, чтобы обновление данных на входе ЦАП производилось только после того, как все импульсы с выхода ключа (за один период входного сигнала) поступили на счётчик. Для этого в схему вводится буфер (Б) и система формирователей одиночных импульсов (ФОИ). Буфер имеет N входных и выходных каналов, логические сигналы передаются на выходы по приходу положительного импульса на управляющий вход. При этом, если на управляющем входе присутствует низкий уровень, буфер «запоминает» состояния выходов и не изменяет их. ФОИ1 запускается по нисходящему фронту импульса входного сигнала и формирует на своём выходе одиночный импульс положительной полярности, длительность которого много меньше периода следования сигналов ШИМ, этот сигнал «защёлкивает» выход счётчика на вход ЦАП, который формирует на выходе устройства постоянное напряжение, величина которого пропорциональна длительности импульса входного сигнала. К этому моменту счётчик уже завершил подсчёт импульсов и его выходы находятся в стабильном состоянии. Нисходящий фронт выходного импульса ФОИ1 также служит для запуска ФОИ2, который подключен к входу сброса счётчика, это позволяет вернуть систему в исходное состояние. При этом буфер фиксирует своё состояние и напряжение на выходе устройства не изменяется.

На основе приведённой структурной схемы был произведён подбор компонентов и разработана принципиальная электрическая схема восьмибитного преобразователя (рис. 3).

В качестве генератора тактовых импульсов выступает кварцевый генератор, формирующий высокостабильный меандр [9]. Такие микросхемы выпускаются только с частотами определённого номинала (от 1 МГц и выше), но для работы устройства не всегда необходима такая высокая частота, поэтому в качестве делителя частоты применён сдвоенный двоичный 4-х разрядный счётчик (микросхема 74НСТ393М), на выходах которого можно получить 500кГц, 250кГц, 175кГц, 87кГц.

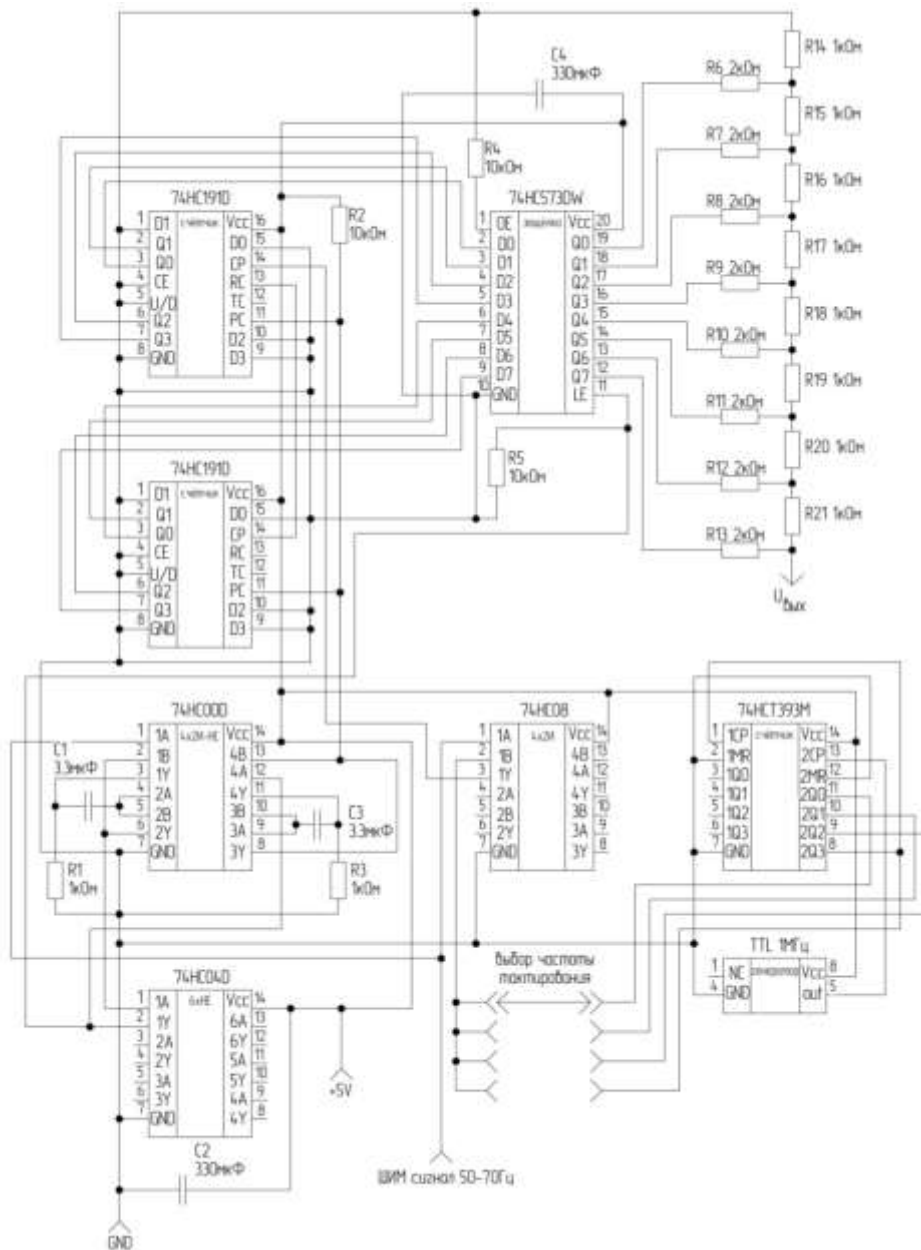


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема преобразователя

Fig. 3. The basic electrical circuit of the converter

Применив каскадное включение двух счётчиков, входящих в состав микросхемы можно получить 44кГц, 22кГц, 11кГц. Это необходимо в случае, если период входного сигнала становится слишком большим или, при увеличении скважности импульсов или при необходимости понизить разрядность преобразователя. Для установки необходимой частоты вход ключа просто подключается к соответствующему выходу микросхемы.



Роль ключа выполняет логическое «И», один из четырёх функциональных блоков микросхемы 74НС08 [10]. На выходе 3 микросхемы появляются импульсы тактового генератора только если на входе 1 присутствует сигнал высокого уровня, формируемый импульсом положительной полярности на входе схемы.

С выхода ключа импульсы поступают на 8-разрядный счётчик, выполненный на двух микросхемах 74НС191D, соединённых каскадно [11]. Эта микросхема является 4-х разрядным двоичным реверсивным счётчиком с возможностью установки начального значения. Вход PC (11) является линией сброса. RC(13) – выход переполнения, в случае, если на вход микросхемы пришло более 16 отсчётов, на нём формируется импульс положительной полярности. Вывод C3 (14) служит входом для подсчитываемой последовательности импульсов.

Роль буфера между счётчиком и цифро-аналоговым преобразователем выполняет микросхема 74НС573DW – регистр-зашёлка с 8 разрядной линией данных, имеющий два управляющих входа [12]. При подаче импульса положительной полярности на вход LE (11) данные с входов «зашёлкиваются» на выходах (по восходящему фронту). DE(1) – линия сброса регистра.

Цифро-аналоговый преобразователь с параллельным входом является довольно распространённой схемой включения резисторов (R6-R21) [13,14]. Каждый вход имеет определённый «вес» в вольтах выходного напряжения. Схема обеспечивает высокую точность преобразования при использовании резисторов с допуском в 1%.

Формирователи одиночных импульсов представляют собой одновибраторы, выполненные на микросхеме 74НС00D, являющейся сборкой из 4-х элементов «2И-НЕ», и микросхеме 74НС04D, которая представляет собой сборку из 6-и инвертирующих вентилей [15,16]. Запуск первого одновибратора осуществляется по нисходящему фронту импульса входного сигнала, формируемый им восходящий фронт «зашёлкивает» буфер. А нисходящий фронт его импульса запускает второй одновибратор, производящий сброс обоих счётчиков.

Логика работы функциональных блоков схемы была протестирована в программе Multisim. Особый интерес представляет моделирование работы одновибраторов (рис. 4).

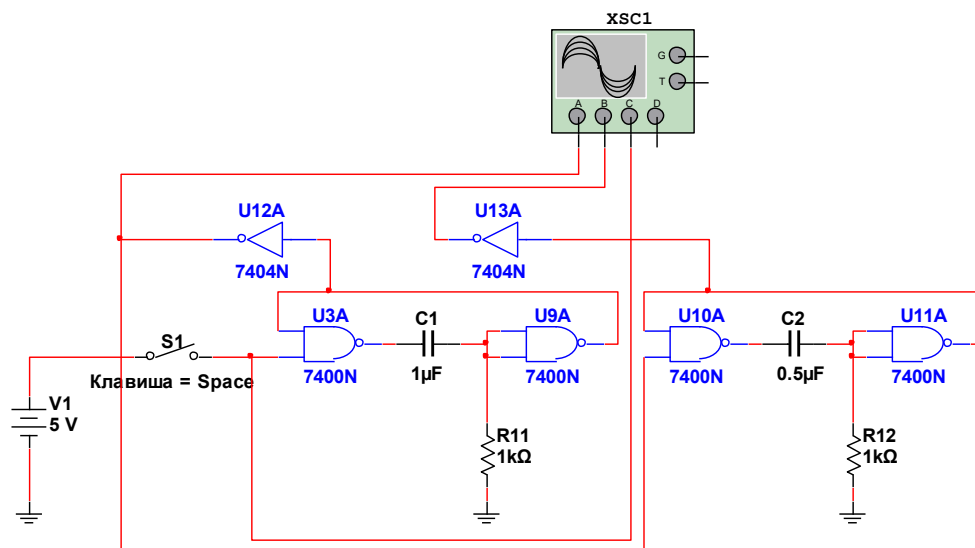


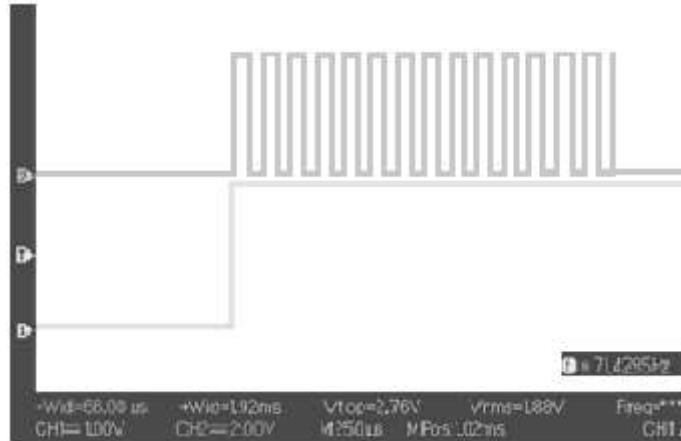
Рис. 4. Модель формирователей одиночных импульсов (одновибраторов) в среде Multisim  
Fig. 4. Single pulse (single-switch) model in a Multisim environment

Схема, приведённая на рисунке 4, была собрана и протестирована на реальных компонентах. Большинство приведённых микросхем были заменены на отечественные аналоги. Кроме того, были добавлены светодиодные шкалы для индикации работы счётчиков и буфера. Для проведения отладки был предусмотрен режим «ручного» ввода данных. В качестве источника ШИМ сигнала служил выход приёмника аппаратуры радиоуправления моделями. Он

предназначен для управления сервоприводами и регуляторами хода электрических двигателей. Сигнал на выходе имеет следующие характеристики:

- частота – 70Гц;
- амплитуда напряжения – 5В;
- скважность импульсов – 5-10%.

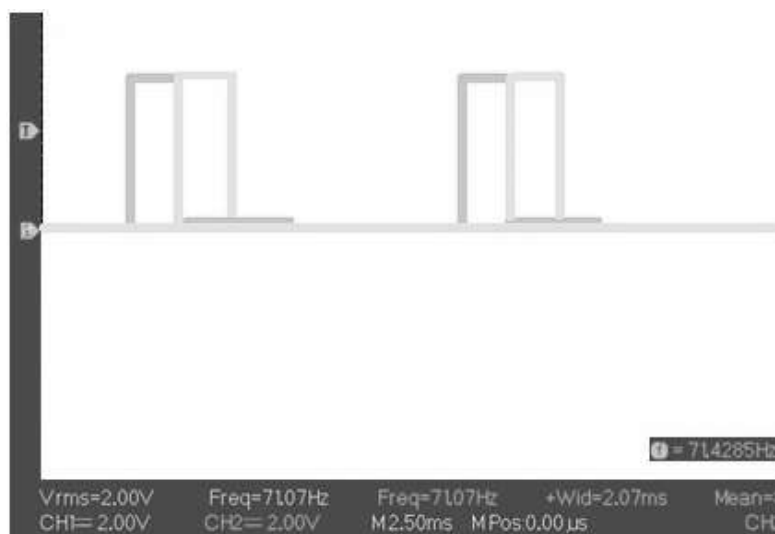
Далее рассмотрим осциллограммы, иллюстрирующие логику работы устройства. На рис. 5 приведен график, показывающий последовательность импульсов, формируемых на выходе ключа и форму огибающей – импульса ШИМ сигнала на одном из его входов. Частота работы тактового генератора в данном эксперименте составляет порядка 10кГц.



*Рис. 5. Модулированный сигнал на выходе ключа и огибающая (форма входного импульса ШИМ)  
Fig. 5. Modular signal at key output and bounding (form of the input pulse of the PWM)*

Анализ данного рисунка позволяет также визуализировать один из основных источников погрешности преобразователя. Дело в том, что в один период сигнала ШИМ может укладываться не целое число отсчётов тактового генератора. В результате, возможно возникновение случайной ошибки в количестве импульсов, попадающих на вход счётчика. Естественно, при разрядности в 8 бит (256 отсчётов на период), такое небольшое отклонение будет вызывать совсем незначительные колебания напряжения на выходе преобразователя (порядка 20мВ при номинальном размахе напряжения от 0В до 5В).

На рис. 6 приведена осциллограмма работы одновибраторов, формирующих импульсы для «защёлкивания» буфера и сброса счётчиков.



*Рис. 6. Форма сигналов на выходах одновибраторов  
Fig. 6. Signal form at the outputs of the single switch*

При этом иллюстрируется логика работы системы сброса. Импульс для сброса счётчиков формируется по нисходящему фронту импульса «защёлкивающего» данные буфера. Длительность этих импульсов определяется параметрами RC цепочки в составе одновибраторов, при необходимости она может быть уменьшена.

На рисунке 7 приведена сравнительная осциллограмма, показывающая зависимость напряжения на выходе преобразователя от длительности ШИМ, при этом рассматриваются минимальная и максимальная длительность импульса.

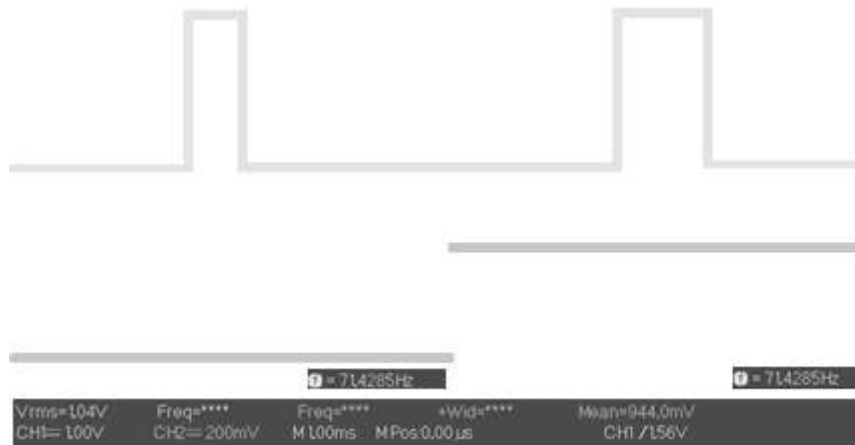


Рис. 7. Зависимость напряжения на выходе преобразователя от скважности ШИМ  
Fig. 7. Voltage dependence on the output of the converter from the PWM

Из рисунка 7 видно, что при частоте входного сигнала 71Гц (коэффициент заполнения изменяется от 7,14% до 14,3%), выходное напряжение изменяется с размахом в 400мВ, что является хорошим результатом. При этом, как уже говорилось ранее, имеется возможность подстроить режим работы тактового генератора под длительность входных импульсов, обеспечив наибольшую чувствительность схемы.

Далее приведён расчёт погрешности преобразователя. Для начала определим погрешность передаточной функции, считая параметры ЦАП идеальными. В качестве примера рассмотрим преобразование ШИМ сигнала с частотой 50Гц ( $T=20\text{мС}$ ) с коэффициентом заполнения от 0% до 100% (0-20мС). Оптимальная частота тактового генератора подбирается таким образом, чтобы в максимальную длительность импульса входного сигнала укладывалось 256 тактовых отсчётов:

$$F_{\Gamma} = 256 * F_{\text{ШИМ}}$$

В данном случае получается 12800 Гц, выбирается ближайшее значение частоты, на которую может быть настроен генератор – 11000Гц ( $\tau_{\Gamma} = 9,1 * 10^{-5}\text{с}$ ). Выражение, показывающее зависимость выходного напряжения от количества импульсов на входе ( $N$ ) (длительности импульса входного сигнала  $\tau$ , секунд):

$$U_{\text{ВЫХ}} = 20\text{мВ} * N$$

Для  $\tau = 0$ :  $U_{\text{ВЫХ}} = 0\text{В}$ . Для  $\tau = 0,02$ :  $U_{\text{ВЫХ}} = 4,4\text{В}$ .

Абсолютная погрешность выходного напряжения составит:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = 20\text{мВ} * \tau_{\Gamma} * F_{\Gamma} = 0,02\text{В}$$

Тогда относительная погрешность:



$$\delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U(\tau \rightarrow \tau_r)} * 100\% \approx 2\%$$

где  $U(\tau \rightarrow \tau_r)$  – выходное напряжение, рассчитанное по функции преобразования для длительности импульса входного сигнала меньшей, чем длительность импульса тактового генератора.

Относительная погрешность преобразователя (погрешность квантования) составляет порядка 2%.

Рассмотрим погрешность, искажающую линейность функции преобразования, вызванную разбросом номиналов в матрице ЦАП. Можно принять, что все резисторы, составляющие матрицу имеют абсолютно точные значения. Тогда характеристика ЦАП будет линейна. Однако, резисторы имеют разброс номинала, обусловленный особенностями производственного процесса, в результате, даже номиналы элементов из одной партии могут отличаться. В конструкции устройства использовались резисторы с допусками 5%. Эксперименты показывают, что разброс номиналов приводит к изменению веса каждого входа (бита) ЦАП.

Таблица

**Влияние разброса номиналов резисторов на нелинейность ЦАП**

Table

**Effect of dispersion of resistor nomenclature on non-linearity of DAC**

Число импульсов, ед.	1	2	4	8	16	32	64	128
U <sub>вых</sub> (теория), В	0,02	0,04	0,078	0,156	0,312	0,625	1,25	2,5
U <sub>вых</sub> (эксперимент), В	0,018	0,0378	0,0763	0,1538	0,3094	0,6198	1,247	2,519

На рисунке 8 наглядно показана относительная погрешность, вносимая каждым разрядом. Можно отметить, что она носит мультипликативный характер. Корректировка может осуществляться подбором номиналов резисторов.

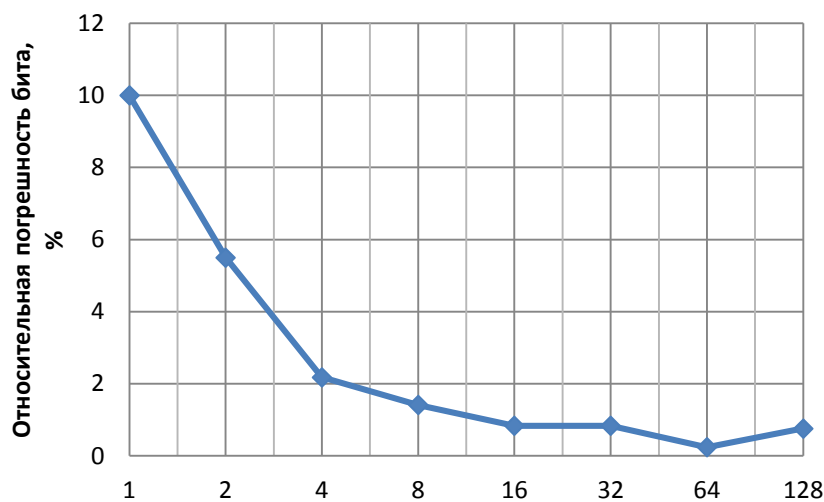


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности резистивной матрицы  
Fig. 8. Dependency of the relative error of the resistant matrix

В заключение необходимо отметить, что схема преобразователя имеет потенциал к дальнейшей модернизации. Так разрядность можно увеличить до 12 бит, расширив резистивную матрицу и повысив разрядность счётчиков. Точность подстройки частоты тактового генератора можно увеличить, применив специализированные микросхемы генераторов импульсов с плавной подстройкой частоты. Для питания ЦАП и буфера рекомендуется применять стабилизированный

источник питания, что повысит стабильность выходного напряжения. На выходе ЦАП необходимо добавить операционный усилитель, включённый по схеме повторителя, для того чтобы уменьшить выходной импеданс преобразователя, что даст возможность подключать к выходу даже низкоомную нагрузку. Наконец, приведённую структуру можно (в значительном объёме) реализовать на ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема), что уменьшит габариты устройства и позволит увеличить количество каналов преобразователя [17]. Кроме того, это даст возможность отбрасывать младшие (незначачие) разряды счётчика, что увеличит размах выходного напряжения при преобразовании сигнала.

### Список литературы

1. Слепов Н.Н., Дроздов Б.В. Широтно-импульсная модуляция. Анализ и применение в магнитной записи. М.: Энергия, 1978. 192 с.
2. Днищенко В.А. Дистанционное управление моделями. СПб.: Наука, 2007. 455 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники, Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2016. 704 с.
4. M. Thoren., C. Steward. Accurate, fast setting analog voltages from digital PWM signals // Design notes 538 (from Linear technology).
5. David M. Alter. Using PWM Output as a Digital-to-analog converter on a TMS320F280 digital signal controller // Application report. September 2008.
6. Ревич Ю. Занимательная электроника. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 664 с.
7. Конвертер ШИМ-напряжение PLP-P1 [Руководство по эксплуатации]. [https://purelogic.ru/data/docs/elektronika\\_chpu/modul\\_shim\\_plp\\_p1\\_user\\_manual\\_ru.pdf](https://purelogic.ru/data/docs/elektronika_chpu/modul_shim_plp_p1_user_manual_ru.pdf) (дата обращения 28.08.2018).
8. Техническая документация LTC2645 [LinearTechnology]. <http://www.farnell.com/datasheets/1841852.pdf> (дата обращения 25.08.2018).
9. Кварцевый резонатор и кварцевый генератор [Практическая электроника]. <https://www.ruselectronic.com/kvartsevuj-rezonator-i-kvartsevuj-generator/> (дата обращения 20.08.2018).
10. Техническая документация 74HC08 [TexasInstruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc08.pdf> (дата обращения 26.08.2018).
11. Техническая документация 74HC191D [TexasInstruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc191.pdf> (дата обращения 26.08.2018).
12. Техническая документация 74HC573D [PhilipsSemiconductors]. <https://static.chipdip.ru/lib/225/DOC000225305.pdf> (дата обращения 27.08.2018).
13. Basic DAC Architectures 2: Binary DACs [Analog Devices] <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-015.pdf> (дата обращения 27.08.2018).
14. R2R ЦАП. Практическое применение [AVRdevices]. <http://avrdevices.ru/r-2r-cap-praktiticheskoe-primenenie> (дата обращения 25.08.2018).
15. Техническая документация 74HC00D [TexasInstruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd54hc00.pdf> (дата обращения 26.08.2018).
16. Техническая документация 74HC04D [PhilipsSemiconductors]. <https://static.chipdip.ru/lib/058/DOC000058311.pdf> (дата обращения 28.08.2018).
17. Бахмутский А.А., Волков С.В., Колдов А.С. Реализация цифровых устройств на ПЛИС // Общие и комплексные проблемы естественных и точных наук: Тр. международного симпозиума. Пенза: 2007.

### References

1. Slepov N.N., Drozdov B.V. Pulse width modulation. Analysis and application in magnetic recording. M.: Energy, 1978. 192 p.
2. Dnischenko V.A. Remote control of models. SPb.: Science, 2007. 455 p.
3. Horowitz P., Hill U. The Art of Circuit Engineering, Trans. with English. M.: BINOM, 2016. 704 p.
4. M. Thoren., C. Steward. PWM signals // Design notes 538 (from Linear technology).
5. David M. Alter. TMS320F280 digital signal controller // Application report. September 2008.
6. Revich Y. Entertaining electronics. Spb.: BHV-Petersburg, 2007. 664 p.
7. PWM-voltage converter PLP-P1 [Operation manual]. [https://purelogic.ru/data/docs/elektronika\\_chpu/modul\\_shim\\_plp\\_p1\\_user\\_manual\\_ru.pdf](https://purelogic.ru/data/docs/elektronika_chpu/modul_shim_plp_p1_user_manual_ru.pdf) (data accessed 28.08.2018).

8. Technical documentation LTC2645 [Linear Technology]. <http://www.farnell.com/datasheets/1841852.pdf> (data accessed 25.08.2018).
9. Quartz resonator and quartz oscillator [Practical electronics]. <https://www.ruselectronic.com/kvartsevyj-rezonator-i-kvartsevyj-generator/> (data accessed 20.08.2018).
10. Technical documentation 74HC08 [Texas Instruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc08.pdf> (data accessed 26.08.2018).
11. Technical Documentation 74HC191D [Texas Instruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc191.pdf> (data accessed 26.08.2018).
12. Technical documentation 74HC573D [Philips Semiconductors]. <https://static.chipdip.ru/lib/225/DOC000225305.pdf> (data accessed 27.08.2018).
13. Basic DAC Architectures 2: Binary DACs [Analog Devices] <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-015.pdf> (data accessed 27.08.2018).
14. R2R DAC. Practical application [AVR devices]. <http://avrdevices.ru/r-2r-cap-praktiticheskoe-primeneniye> (data accessed 25.08.2018).
15. Technical Documentation 74HC00D [Texas Instruments]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd54hc00.pdf> (data accessed 26.08.2018).
16. Technical documentation 74HC04D [Philips Semiconductors]. <https://static.chipdip.ru/lib/058/DOC000058311.pdf> (data accessed 28.08.2018).
17. Bakhmutsky A.A., Volkov S.V., Koldov A.S. Implementation of digital devices on FPGA // General and complex problems of natural and exact sciences: Tr. international symposium. Penza: 2007.

**Бражников Артём Максимович**, студент магистратуры Самарского государственного технического университета  
**Бражникова Александра Максимовна**, студент магистратуры Самарского государственного технического университета

**Забержинский Борислав Эдуардович**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий

**Brazhnikov Artem Maximovich**, Graduate student of Samara State Technical University

**Brazhnikova Aleksandra Maximovna**, Graduate student of Samara State Technical University

**Zaberzhinsky Borislav Eduardovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information Technology