

МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БИНАРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В. М. Гречишников¹, А. Е. Капитуров², К. Б. Нерсисян³, О. В. Теряева⁴

^{1,2,3,4} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
¹gv@ssau.ru, ²andrew_bee@mail.ru, ³nersisyan-k@list.ru, ⁴arefeva_olga@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена конструкция и принцип действия мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя бинарных механических сигналов на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя (ЦАП) последовательного типа. *Материалы и методы.* Описан способ линеаризации функции преобразования устройства, его математическая и имитационная модели. *Результаты и выводы.* Обосновываются преимущества предложенного устройства по сравнению с аналогом на основе параллельного ЦАП.

Ключевые слова: волоконно-оптический цифроаналоговый преобразователь, математическая модель, имитационная модель, логарифмический усилитель, аналого-цифровой преобразователь

Для цитирования: Гречишников В. М., Капитуров А. Е., Нерсисян К. Б., Теряева О. В. Мультисенсорный волоконно-оптический преобразователь бинарных механических сигналов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 95–103. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-12

MULTI-SENSOR FIBER-OPTIC CONVERTER OF BINARY MECHANICAL SIGNALS

V.M. Grechishnikov¹, A.E. Kapiturov², K.B. Nersisyan³, O.V. Teryaeva⁴

^{1,2,3,4} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia
¹gv@ssau.ru, ²andrew_bee@mail.ru, ³nersisyan-k@list.ru, ⁴arefeva_olga@inbox.ru

Abstract. *Background.* The design and principle of operation of a multi-sensor fiber-optic converter of binary mechanical signals based on a fiber-optic digital-to-analog converter (DAC) of a serial type is considered. *Materials and methods.* The method of linearization of the device transformation function, its mathematical and simulation models are described. *Results and conclusions.* The advantages of the proposed device in comparison with an analog based on a parallel DAC are substantiated.

Keywords: fiber-optic digital-to-analog converter, mathematical model, simulation model, logarithmic amplifier, analog-to-digital converter

For citation: Grechishnikov V.M., Kapiturov A.E., Nersisyan K.B., Teryaeva O.V. Multi-sensor fiber-optic converter of binary mechanical signals. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):95–103. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-12

Введение

Мультисенсорные волоконно-оптические преобразователи информации находят все более широкое применение в системах управления сложным технологическим оборудованием [1, 2], а также мониторинга пространственно распределенных объектов промышленной [2], транспортной и социальной инфраструктуры [3]. К настоящему времени разработаны мультисенсорные преобразователи давления, температуры, механических деформаций, влажности и других физических параметров, способных надежно функционировать в экстремальных условиях эксплуатации [4]. Наиболее распространенной конструктивно-технологической платформой для создания пространственно распределенной волоконно-оптической мультисенсорной измерительной структуры являются одномодовые световоды с последовательно расположенными в них внутриволоконными решетками Брэгга [5]. К недостаткам таких преобразователей следует отнести сложность аппаратуры формирования и обработки сигналов, высокую удельную стоимость сенсорного канала, недостаточную

устойчивость сенсоров к бинарным силовым воздействиям и невысокую надежность, свойственную техническим устройствам с последовательным соединением функциональных элементов.

В связи с этим в работах [6–8] предложен и теоретически обоснован новый класс мультисенсорных преобразователей бинарных механических сигналов (МПБС) в электрические с дистанционным разнесением чувствительных элементов и электронного блока с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Основным системообразующим элементом в них является волоконно-оптический цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с суммированием весовых коэффициентов, состоящий из набора оптических аттенуаторов и волоконно-оптического сумматора. Входные бинарные механические сигналы в них с помощью оптико-механических переключателей преобразуются в логические оптические сигналы, которые с помощью ЦАП преобразуются в аналоговый квантованный сигнал. Полученный сигнал передается по волоконно-оптической линии связи в электронный блок, в котором производится фотоэлектрическое преобразование и восстановление входных сигналов МПБС в виде электрического кода.

Недостатком МПБС на основе параллельных ЦАП является необходимость прокладки отдельного световода к каждой точке контролируемого пространства, что усложняет конструкцию и приводит к значительным материальным затратам.

В связи с этим представляется актуальной разработка и исследование новых структурно-алгоритмических решений преобразователей на основе волоконно-оптических ЦАП с последовательной структурной схемой.

Такие конструкции позволяют повысить технико-экономическую эффективность МПБС за счет возможности подключения к общей волоконно-оптической шине необходимого набора чувствительных элементов. Особенностью таких преобразователей является нелинейность функции преобразования, что требует применения нестандартизированных аналого-цифровых преобразователей с нелинейной функцией преобразования. Поэтому разработка и теоретическое обоснование конструкции МПБС, основанной на новом способе линеаризации функции преобразования, обеспечивающей возможность использования в электронном блоке линейных аналого-цифровых преобразователей, является актуальной задачей.

Конструкция и математическая модель мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации

Структурная схема мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации представлена на рис. 1.

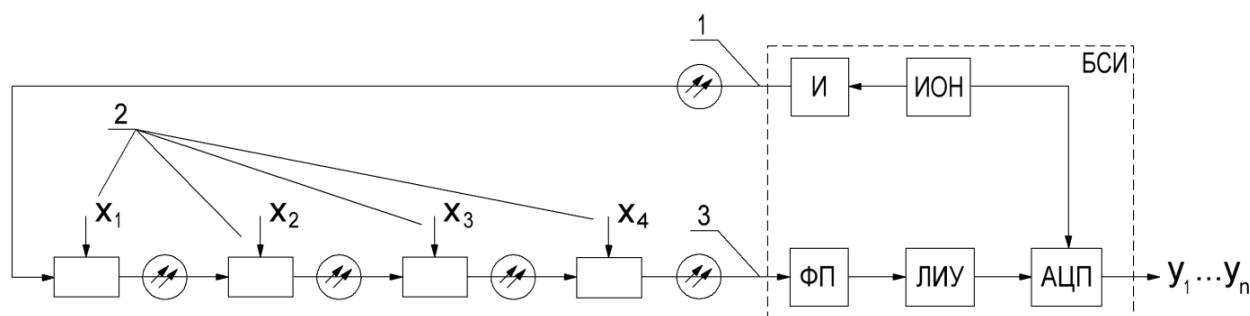


Рис. 1. Структурная схема мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БСИ – блок сбора информации; И – излучатель; ИОН – источник опорного напряжения; ЛИУ – логарифмирующий интегрирующий усилитель; ФП – фотоприемник

Устройство предназначено для однозначного дистанционного преобразования входного бинарного механического кода x_1, x_2, \dots, x_m в электрический код y_1, y_2, \dots, y_m . Отличием рассматриваемого устройства от известных [9] является использование в нем волоконно-оптического ЦАП с последовательной структурой. ЦАП состоит из последовательно соединенных к волоконно-оптической линии связи оптических аттенуаторов 2, одновременно выполняющих функции переключения оптических сигналов. В качестве примера, без ущерба для общности рассуждений, в статье рассмотрен четырехразрядный ЦАП. Данное устройство работает следующим образом. Напряжение с первого выхода источника опорного напряжения ИОН задает ток накачки излучателя И и, соответственно, уровень оптической мощности на его выходе. Направленное оптическое излучение с выхода излучателя с помощью передающего моноволоконного световода 1 подводится к группе

оптических переключателей со встроенными аттенюаторами 2, которые в нажатом состоянии осуществляют деление оптической мощности излучения в соответствии с выражением

$$K_n = \frac{1}{2^{n-1}}, \quad (1)$$

где n – порядковый номер переключателя.

При разомкнутом оптическом переключателе оптическое излучение передается без ослабления ($K = 1$). Таким образом, оптическое излучение, проходя через последовательно соединенные аттенюаторы, получает свои весовые коэффициенты в соответствии с выражением (1). Взвешенный таким образом световой поток по оптическому моноволоконному кабелю 3 поступает на вход фотоприемника ФП. При этом мощность оптического сигнала на фотоприемнике будет определяться выражением

$$P_{\text{вх}} = K_1 K_2 K_3 K_4 P_{\text{изл}}. \quad (2)$$

В фотоприемнике оптическое излучение преобразуется в пропорциональный ему электрический сигнал (рис. 2) и поступает на логарифмический инвертирующий усилитель ЛИУ. Сигнал на выходе фотоприемника описывается выражением

$$U_{\text{ФП}} = S_{\text{ФП}} P_{\text{вх}} = S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}} \prod_{i=1}^4 K_i, \quad (3)$$

где $S_{\text{ФП}}$ – вольтовая чувствительность фотоприемника, $[S_{\text{ФП}}] = \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$.

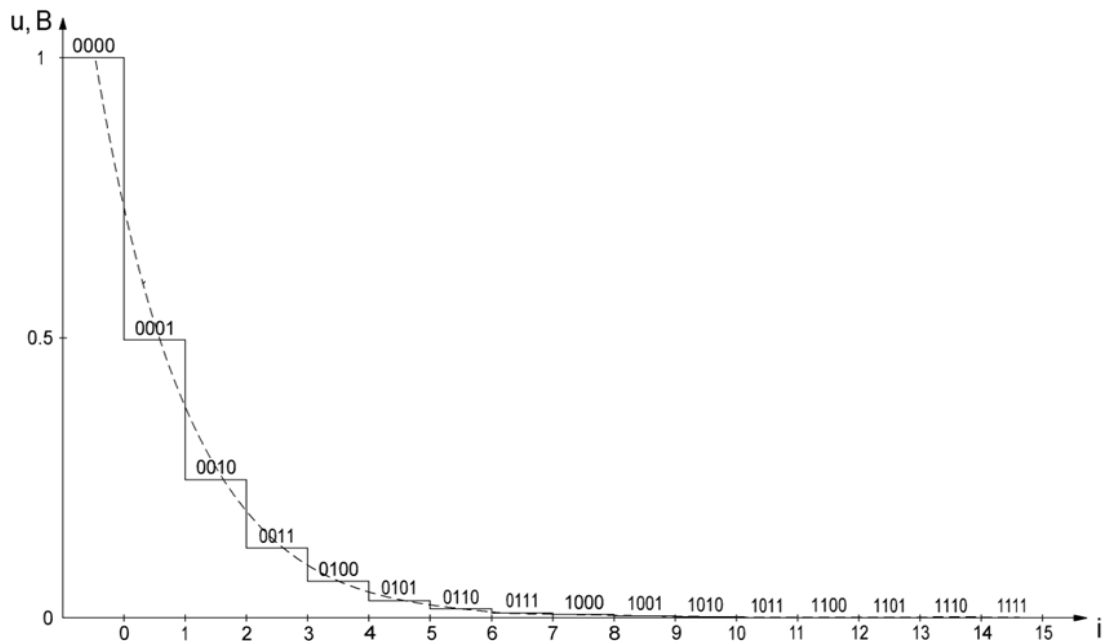


Рис. 2. График сигнала на выходе фотоприемника

Характер нелинейной зависимости на рис. 2 свидетельствует о возрастании энергетических потерь в оптической схеме при увеличении числа разрядов входного кода, что, с одной стороны, ограничивает информационную емкость устройства на уровне 3–4 бит, а с другой – требует применения нелинейного аналого-цифрового преобразователя в блоке электронной обработки сигнала. В связи с этим рассмотрим способ линейаризации функции преобразования устройства, основанный на логарифмировании сигнала фотоприемника.

Сигнал на выходе логарифмического усилителя будет описываться выражением

$$U_{\text{вых}} = A \log_2 \left(S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}} \prod_{i=1}^4 K_i \right) = A \left[\log_2 (S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}}) + \sum_{i=1}^4 \log_2 K_i \right]. \quad (4)$$

Учитывая выражение (1), а также то, что максимальное значение напряжения равно $S_{\text{ФП}} P_{\text{ИЗЛ}} = U_{\text{МАХ}}$, выражение (4) можно переписать в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = A \left(\log_2 U_{\text{МАХ}} - \sum_{n=1}^4 x_n 2^{n-1} \right), \quad (5)$$

где $x_n = \overline{0,1}$ – значения разрядных цифр входного кода, параметр усилителя, $[A] = B$.

Из выражения (4) видно, что сигнал на выходе логарифмического усилителя представляет собой линейную функцию входного кода x_1, x_2, \dots, x_m , что делает возможным восстановление входного механического кода в электрической форме за счет линейного аналого-цифрового преобразования сигнала с выхода логарифмического усилителя.

Далее на вход АЦП поступает сигнал, пропорциональный установившемуся значению выходного сигнала инвертирующего усилителя. При использовании интегрального АЦП параллельного преобразования (рис. 3) процесс аналого-цифрового преобразования можно представить в виде последовательности следующих операций [9].

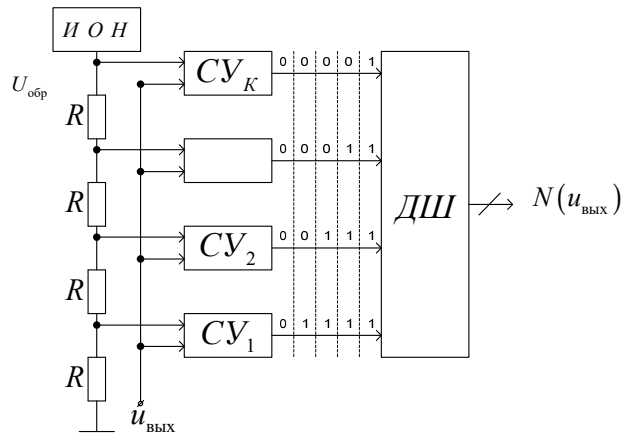


Рис. 3. Функциональная схема АЦП параллельного преобразования

В начале с помощью компараторов $CU_1 - CU_k$ формируется единичный код $e = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, где $e_i = \overline{0,1}$. Математическую модель работы компараторов представим в виде

$$e_i = \begin{cases} 1, & u_{\text{ВЫХ}}(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq u_{\text{пор}i}, \\ 0, & u_{\text{ВЫХ}}(x_1, x_2, \dots, x_k) < u_{\text{пор}i}, \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{\text{пор}i} = \frac{u_{\text{обp}}}{m} i$; i – порядковый номер компаратора; m – общее число компараторов; $u_{\text{обp}}$ – напряжение источника опорного сигнала.

Затем преобразуем единичный код в единичный позиционный в соответствии с выражением

$$\begin{cases} b_i = e_i \overline{e_{i+1}}, & i = 1 \dots (m-1), \\ b_m = e_m \overline{e_0}. \end{cases} \quad (7)$$

В результате обработки в дешифраторе логических сигналов $b_1 \dots b_m$ в соответствии с выражением

$$a_i(x) = \bigcap_{t=2^i(2k+1)}^{\overline{2^{i+1}(k+1)-1}} b_t(x), \quad k = 0 \dots (2^{n-1-i} - 1), \quad i = \overline{0, n-1} \quad (8)$$

на выходе АЦП формируется двоичный электрический код, значения разрядных цифр которого y_1, y_2, \dots, y_m однозначно определяются положениями оптических переключателей x_1, x_2, \dots, x_m .

Совокупность математических выражений представляет собой математическую модель рассматриваемого устройства.

Конструкция оптического переключателя с регулируемым аттенуатором

Одним из важнейших элементов рассматриваемого преобразователя являются регулируемые оптические аттенуаторы, в которых осуществляется функция назначения весового коэффициента и переключения оптических сигналов. Принцип совмещения в нем функций регулируемого аттенуатора и переключателя оптических сигналов иллюстрируется на рис. 4 [10].

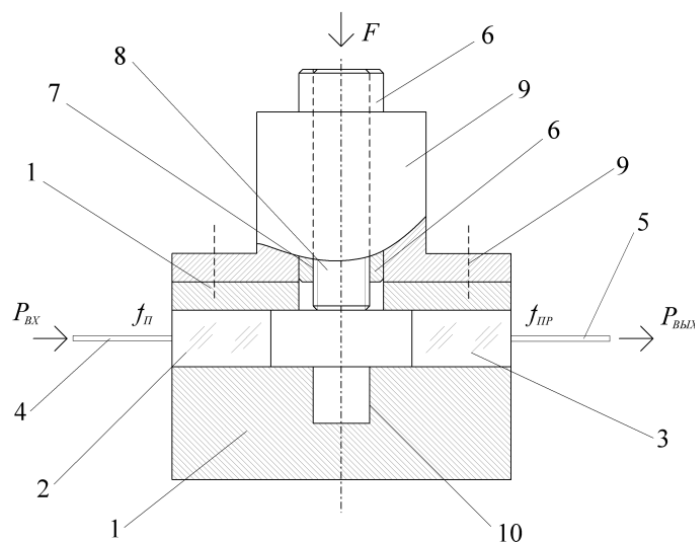


Рис. 4. Конструкция оптического переключателя с регулируемым аттенуатором:

- 1 – корпус; 2 – передающая градиентная цилиндрическая линза; 3 – приемная градиентная цилиндрическая линза; 4 – передающий моноволоконный световод; 5 – приемный моноволоконный световод; 6 – круглый подвижный шток; 7 – резьбовое отверстие; 8 – резьбовой стержень; 9 – двухпозиционное устройство фиксации штока в крайних положениях; 10 – глухое цилиндрическое отверстие

Данный оптический переключатель работает следующим образом. Входной оптический сигнал с помощью световода 4 подается в фокус градиентной линзы 2. На выходе этой линзы формируется коллимированный световой поток, который распространяется по воздушному зазору и попадает на входной торец линзы 3. Использование в конструкции аттенуатора градиентных линз обусловлено слабой зависимостью вносимых энергопотерь η_R от зазора, которые определяются выражением [11]

$$\eta_R = -10 \cdot \lg \left(\frac{r}{r + \Theta \cdot R} \right)^2, \quad (9)$$

где r – радиус линзы (1,5...2 мм); Θ – угол расходимости излучения (5...10 мрад); R – зазор между линзами.

Из приведенного выражения видно, что даже при достаточно большом зазоре между линзами 10 мм потери не превышают 0,56 Дб.

После воздействия на шток силы F с помощью фиксатора 9 шток 6 фиксируется в крайнем нижнем положении. При этом нижняя часть резьбового стержня 8 входит в воздушный зазор между линзами 2 и 3. Это приводит к экранировке светового потока на входе линзы 3. В этом случае светопропускание будет определяться положением нижнего торца резьбового стержня 8 в воздушном зазоре между градиентными линзами 2 и 3. Путем вращения стержня 8 можно регулировать его вертикальное положение в зазоре между линзами и за счет этого устанавливать необходимый коэффициент ослабления оптического сигнала в диапазоне от 0 до 1. При повторном воздействии силы на шток 6 фиксируется в крайнем верхнем положении, при этом резьбовой стержень 8 полностью выходит из зазора между линзами 2 и 3. Глухое отверстие 10 в корпусе 1 предотвращает заклинивание штока 6 при чрезмерно выдвинутом резьбовом стержне 8. Путем циклического механи-

ческого воздействия на верхний торец штока можно также сформировать последовательность импульсных оптических сигналов заданной амплитуды.

Результаты моделирования работы мультисенсорного преобразователя информации

Для проверки работоспособности предлагаемого преобразователя, собранного на реальной элементной базе, было проведено моделирование структурной схемы преобразователя, изображенной на рис. 1, в пакете программ MicroCap 12 [12]. Достоинствами MicroCap 12 является высокая точность математических моделей реальных электронных компонентов.

В процессе моделирования схема мультисенсорного волоконно-оптического устройства сбора информации для большей точности и простоты была разбита на несколько частей. На рис. 5 представлена электрическая схема логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12.

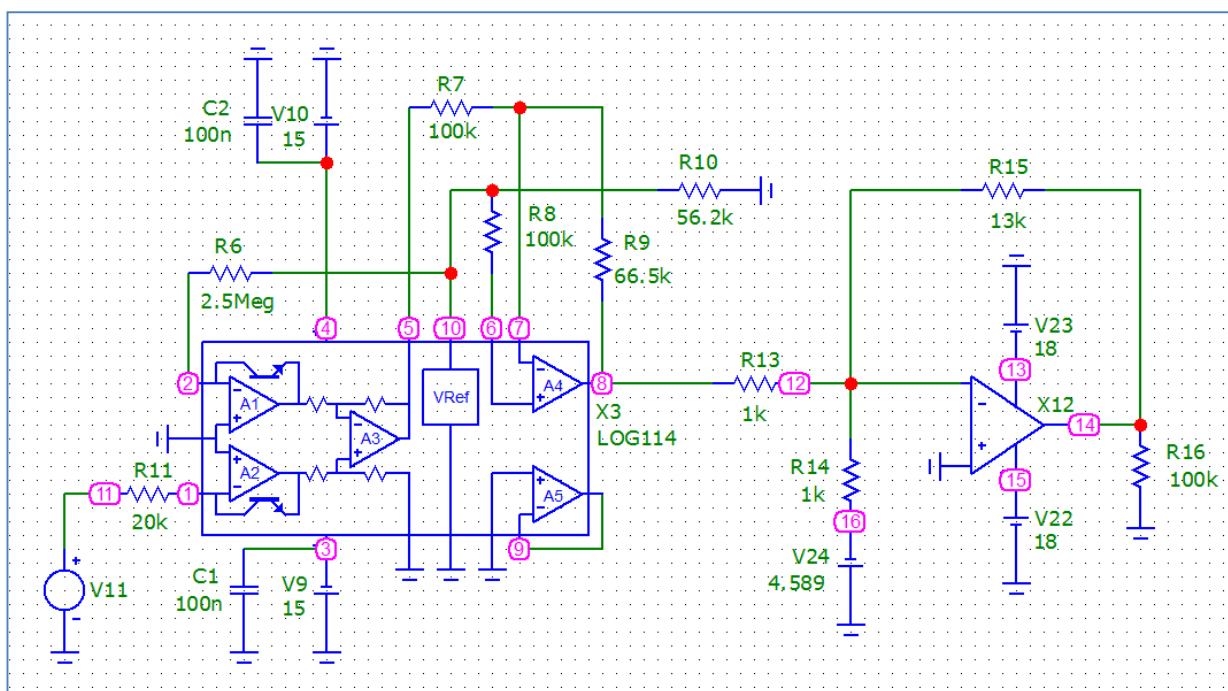


Рис. 5. Электрическая схема логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12

Блок логарифмирующего инвертирующего усилителя ЛИУ (рис. 1) был разбит на два отдельных блока: логарифматор и инвертирующий усилитель (ИУ). В качестве логарифматора было рассмотрено множество вариантов [13], в итоге выбор остановился на планарной микросхеме LOG114 [14] фирмы Burr-Brown от TexasInstruments. Данная микросхема обеспечивает требуемую линейность вольтамперной характеристики (ВАХ) при максимальном токе 50 мкА и, как следствие, ровный ступенчатый сигнал на выходе. Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 6.

На вход логарифматора поступает сигнал, вид которого представлен на рис. 6,а. Каскад на операционном усилителе, выполненный на микросхеме TL071 [15] (рис. 5, компонент X12), является сумматором и инвертирующим усилителем. Источник напряжения V24 служит для задания нулевого уровня на выходе логарифматора. ИУ усиливает сигнал логарифматора в 13 раз и придает ему форму восходящей ступеньки (рис. 6,б). Нагрузочное сопротивление R16 номиналом 100 кОм имитирует входное сопротивление АЦП. При этом ИУ требуется отдельное двухполярное питание величиной ± 18 В, т.е. максимально допустимое напряжение питания. Для исключения неоднозначности преобразования в АЦП максимальное отклонение выходного сигнала ЛИУ от значения шага 1 В составляет около 0,14 В при допустимом 0,25 В [8].

В качестве АЦП было также рассмотрено множество вариантов готовых АЦП на одной микросхеме от фирм TexasInstruments и AnalogDevices, но не все они имеют высокий вход (более 6 В), параллельный выход на 4 разряда или более с сохранением точности. К тому же стоимость одной микросхемы с доставкой составляет более 100\$, поэтому было принято решение разработать в среде MicroCap 12 параллельный АЦП в соответствии с рис. 4.

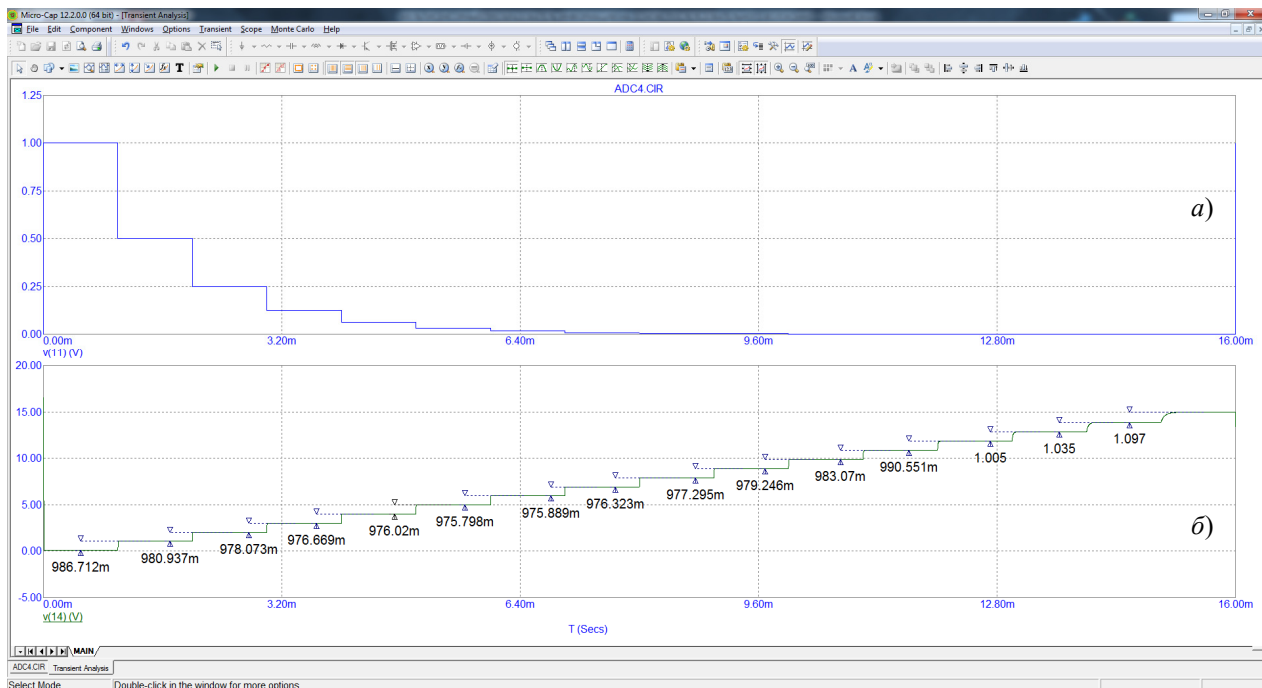


Рис. 6. Графики сигналов логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12:
a – входной сигнал логарифматора; *б* – выходной сигнал инвертирующего усилителя

В качестве источника опорного напряжения (ИОН) используется источник напряжения V1 номиналом 16 В, которое через делители напряжения подается на инвертирующие входы компараторов, выполненных на восьми микросхемах NE4558 [16], сдвоенных ОУ, работающих также и при однополярном напряжении питания. Входной сигнал (эквивалентный выходной сигнал ЛИУ) поступает на неинвертирующие входы компараторов (в соответствии с рис. 4). Выходной сигнал каждого компаратора через делитель для задания необходимого уровня напряжения при ТТЛ (2,4-2,7 В) поступает на вход одного из двух дешифраторов на микросхемах 74F148 [17]. Далее через логические вентили сигналы с выходов дешифраторов поступают на входы четырех *D*-триггеров, выполненных на двух сдвоенных микросхемах 74ALS74A [18], на выходах которых образуются сигналы логических «0» или «1».

Заключение

Полученные результаты разработки функциональной схемы, ее математического и имитационного моделирования нового метода линеаризации функции преобразования подтвердили возможность создания реального четырехразрядного мультисенсорного волоконно-оптического устройства сбора информации на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя с последовательной структурной схемой с использованием современной элементной базы. Установлена сильная зависимость энергетических потерь от количества разрядов преобразователя. Поэтому полученные результаты определяют целесообразность использования разработанных МПБС в качестве малоразрядных (3–4 бита) цифроаналоговых волоконно-оптических секций при создании секционированных многоразрядных преобразователей на основе комбинированной параллельно-последовательной структуры [7].

Список литературы

1. Гармаш В. Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 128–140.
2. Волоконные датчики: перспективы промышленного применения. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2193/doc/54040/>
3. Шишкин В. В., Чурин А. Е., Харенко Д. С., Шелемба И. С. Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-экспресс. 2013. № 6. С. 22–23.
4. Hogan H. With fiber comes miles-long and multiplexed sensors // Photonics Spectra. 2015.

5. Yao J. P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors // *Fiber and Integrated Optics*. 2015. P. 230–242.
6. Теряева О. В. Мультисенсорные преобразователи информации на основе волоконно-оптических ЦАП : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2017. 164 с.
7. Гречишников В. М., Комаров Е. Г. Повышение информационной емкости волоконно-оптического мультисенсорного преобразователя бинарных механических сигналов в электрические // *Измерительная техника*. 2020. № 9. С. 15–23.
8. Зеленский В. А., Гречишников В. М. Бинарные волоконно-оптические преобразователи в системах управления и контроля. Самара : Самарский научный центр РАН, 2006. 120 с.
9. Гречишников В. М., Теряева О. В. Метрология и радиоизмерения. Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2018. 166 с.
10. Патент 2768522 Российская Федерация. Регулируемый оптический аттенюатор / Гречишников В. М., Капитуров А. Е. ; заявитель и патентообладатель Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева ; № 2021106244 ; заявл. 10.03.2021 ; опублик. 24.03.2022.
11. Гречишников В. М. Схемотехника волоконно-оптических устройств. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2018. 172 с.
12. MicroCap 12. URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
13. Микросхемы логарифмических усилителей традиционной схемотехники. URL: <https://kit-e.ru/usil/mikroshemy-logarifmicheskikh-usilitelej-tradiczionnoj-shemotehniki-2/>
14. LOG114. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/180720/BURR-BROWN/LOG114.html>
15. TL071. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5779/MOTOROLA/TL071.html>
16. NE4558. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17944/PHILIPS/NE4558.html>
17. 74F148. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50289/FAIRCHILD/74F148.html>
18. 74ALS74A. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15268/PHILIPS/74ALS74A.html>

References

1. Garmash V.B. Possibilities, tasks and prospects of fiber-optic measuring systems in modern instrumentation. *Foton-ekspress = Photon-express*. 2005;(6):128–140. (In Russ.)
2. *Volokonnye datchiki: perspektivy promyshlennogo primeneniya = Fiber sensors: prospects for industrial application*. (In Russ.). Available at: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2193/doc/54040/>
3. Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Shelemba I.S. Monitoring system of bearing structures of a football arena based on fiber-optic sensors. *Foton-ekspress = Photon-express*. 2013;(6):22–23. (In Russ.)
4. Hogan N. With fiber comes miles-long and multiplexed sensors. *Photonics Spectra*. 2015.
5. Yao J.P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *Fiber and Integrated Optics*. 2015:230–242.
6. Teryaeva O.V. *Mul'tisensornye preobrazovateli informatsii na osnove volokonno-opticheskikh TsAP = Multisensory information converters based on fiber-optic DACs*. PhD dissertation. Samara, 2017:164. (In Russ.)
7. Grechishnikov V.M., Komarov E.G. Increasing the information capacity of a fiber-optic multi-sensor converter of binary mechanical signals into electrical ones. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2020;(9): 15–23. (In Russ.)
8. Zelenskiy V.A., Grechishnikov V.M. *Binarnye volokonno-opticheskie preobrazovateli v sistemakh upravleniya i kontrolya = Binary fiber-optic converters in control and control systems*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2006:120. (In Russ.)
9. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. *Metrologiya i radioizmereniya = Metrology and radio measurements*. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2018:166. (In Russ.)
10. Patent 2768522 Russian Federation. *Reguliruemyy opticheskiy attenyuator = Adjustable optical attenuator* / Grechishnikov V.M., Kapituurov A.E.; applicant and patent holder Samar. nats. issled. un-t im. S. P. Koroleva; № 2021106244; appl. 10.03.2021; publ. 24.03.2022. (In Russ.)
11. Grechishnikov V.M. *Skhemotekhnika volokonno-opticheskikh ustroystv = Circuitry of fiber-optic devices*. Samara: Izd-vo Samar. un-ta, 2018:172. (In Russ.)
12. *MicroCap 12*. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
13. *Mikroskhemy logarifmicheskikh usiliteley traditsionnoy skhemotekhniki = Microcircuits of logarithmic amplifiers of traditional circuitry*. (In Russ.). Available at: <https://kit-e.ru/usil/mikroshemy-logarifmicheskikh-usilitelej-tradiczionnoj-shemotehniki-2/>
14. *LOG114*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/180720/BURR-BROWN/LOG114.html>
15. *TL071*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5779/MOTOROLA/TL071.html>
16. *NE4558*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17944/PHILIPS/NE4558.html>
17. *74F148*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50289/FAIRCHILD/74F148.html>
18. *74ALS74A*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15268/PHILIPS/74ALS74A.html>

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Михайлович Гречишников

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехники,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: gv@ssau.ru

Андрей Евгеньевич Капитуров

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: andrew_bee@mail.ru

Ксения Борисовна Нерсиян

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: nersisyan-k@list.ru

Ольга Викторовна Теряева

кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

Vladimir M. Grechishnikov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of electrical engineering,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Andrey E. Kapiturov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Kseniya B. Nersisyan

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Ol'ga V. Teryaeva

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of electrical engineering,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)
E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022