

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, НГТУ, г. Новосибирск

Заместитель главного редактора

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

А.А. Воевода, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Редакционная коллегия

Ю.Е. Воскобойников, д-р физ.-мат. наук, проф., СибСТРИН, г. Новосибирск

Ю.Д. Григорьев, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ (ЛЭТИ), г. С.-Петербург

А.М. Малышенко, д-р техн. наук, проф., ТПУ, г. Томск

Ю.Ф. Мухомад, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, ИрГУПС, г. Иркутск

А.И. Рубан, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ,

СФУ, Ин-т косм. и информ. технологий, г. Красноярск

В.И. Хабаров, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания

и средств массовых коммуникаций в 2002 г.

(свидетельство ПИ № 77-11739 от 08 февраля 2002 г.)

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ucit@ucit.ru

Web site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

Editorial adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 2307-6879

№ 4 (99)

2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

- Воевода А.А., Шипагин В.И.** Пример полиномиального синтеза регулятора для неквадратного объекта с одним входом и двумя выходами..... 7
- Уляшин А.Ф., Величко А.А.** Исследование методов измерения расстояния в сканирующих дальномерах 21

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Уляшин А.Ф., Величко А.А.** Сравнительный анализ методов построения аналого-цифровых преобразователей..... 38
- Сивак М.А.** Исследование применимости робастных функций в нейронных сетях 50

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Романов Е.Л., Романенко Т.А.** Технология проектирования визуализаторов алгоритмов..... 59
- Правила для авторов 71

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Лицензия № ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 16.12.2020. Выход в свет 18.12.2020
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз. Уч.-изд. л. 4,18
Печ. л. 4,5. Изд. № 40. Заказ № 330. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Editorial board

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

Vostretsov A.G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Deputy Chief Editor

Kharitonov S.A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A.A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Voskoboinikov Yu.E., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering, Novosibirsk, RF

Grigor'ev Iu.D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint-Petersburg, RF

Malysenko A.M., D. Sc. (Eng.), National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, RF

Mukhopad Iu.F., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State University of Railway Engineering,
Irkutsk, RF

Ruban A.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Khabarov V.I., D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

*The journal is registered
in the RF Ministry for press, broadcasting
and masscommunications in 2002
(certificate PI № 77-11739 from February 08, 2002)*

Editorial address: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation.

E-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/sbornik/>

© Authors, 2020

© Novosibirsk State

Technical University, 2020

CONTENTS

AUTOMATIC CONTROL AND IDENTIFICATION

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Example of polynomial controller synthesis for a non-square object with one input and two outputs	7
Ulyashin A.F., Velichko A.A. Study of methods for measuring distances in scanning rang	21

INFORMATION PROCESSING

Ulyashin A.F., Velichko A.A. Comparative analysis of methods for constructing analog-to-digital converters	38
Sivak M.A. The research on using robust functions for neural networks	50

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES

Romanov E.L., Romanenko T.A. Algorithm visualizers design technology	59
Rules for authors	71

Editor *L.N. Kinsht*
Publishing Editor *I.P. Brovanova*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

License № ID 04303 from 20.03.01. Signed in print December 16, 2020.
Date of publication December 18, 2020. Format 60 × 84 1/16.
Offset Paper. Circulation is 50 copies. Educational-ed. liter. 4,18. printed pages 4,5.
Publishing number 40. Order number 330

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
630073, Novosibirsk, 20 K. Marx prospekt

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 681.513

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-7-20

**ПРИМЕР ПОЛИНОМИАЛЬНОГО СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ НЕКВАДРАТНОГО ОБЪЕКТА С ОДНИМ ВХОДОМ
И ДВУМЯ ВЫХОДАМИ***

А.А. ВОЕВОДА¹, В.И. ШИПАГИН²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: uscit@uscit.ru

² 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, соискатель кафедры автоматики. E-mail: shipagin@mail.ru

Всё большее распространение приобретают полиномиальные методы синтеза регуляторов для систем автоматического управления с линейными объектами. Особую трудность представляет синтез многоканальных регуляторов, что вызвано необходимостью использования матричного полиномиального исчисления. Однако при таком подходе в основном рассматриваются объекты с числом входов, равным числу выходов. Это связано с удобством решения системы линейных алгебраических уравнений при матричном полиномиальном исчислении.

В настоящей работе рассматривается полиномиальный метод синтеза регуляторов для неквадратного объекта, т. е. такого, у которого число входных воздействий не равно числу выходных. Выбранная система содержит не только неквадратный объект, но и неквадратный регулятор. В качестве рассматриваемого примера взята линейная модель неустойчивого объекта, имеющая один канал по входному воздействию и два канала по выходному. Необходимо добиться определенных показателей качества выходной векторной величины, при этом управление осуществляется в обратной связи системы и суммируется с входным воздействием. Объект был представлен в виде левого полиномиального разложения, а регулятор – в виде правого.

Ключевые слова: передаточная функция объекта, система управления, метод факторизации, полиномиальный синтез, многоканальные регуляторы, матрица Сильвестра, неквадратный объект

* Статья получена 04 октября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях достаточно часто приходится иметь дело с техническими системами с неравным числом входов-выходов [1–5]. Такие объекты управления могут быть выделены в отдельный класс неквадратных объектов как частный случай многомерных многосвязных систем [6].

Рассматривается возможность синтеза регуляторов для модели неквадратного объекта с двумя выходами и одним входом. Изучается возможность синтеза с использованием полиномиально-матричного описания (polynomial matrix fraction description – PMFD) для такого класса объектов [7–11].

В первом разделе статьи описывается выбранный неквадратный объект, демонстрируется его передаточная функция и осуществляется переход к матричному полиномиальному представлению. Во втором разделе применяется полиномиальный метод синтеза неквадратного регулятора. Третий раздел посвящен имитации выбранного объекта в системе Matlab и проверке работоспособности полученного регулятора [12].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему, содержащую один вход $v(s)$ и два выхода: $out_1(s)$ и $out_2(s)$ (рис. 1).

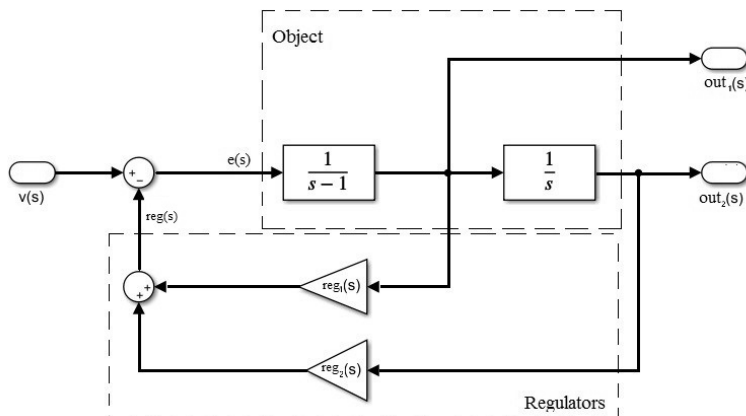


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления «объект–регулятор»

Объект представлен двумя передаточными функциями: $w_{1ob}(s) = 1/(s-1)$ – неустойчивое аperiodическое звено, $w_{2ob}(s) = 1/s$ – интегрирующее звено. На вход объекта поступает ошибка регулирования

$$e(s) = v(s) - reg(s). \quad (1)$$

Тогда матричное описание объекта выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s-1} \\ \frac{1}{s(s-1)} \end{bmatrix} e(s). \text{ Учитывая ассоциативное свойство матриц, вынесем}$$

слева наименьшее общее кратное знаменателей за пределы матрицы:

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s(s-1)} \begin{bmatrix} s \\ 1 \end{bmatrix} e(s). \quad (2)$$

Пусть $\mathbb{R}(s)$ – множество передаточных функций – дробей вида $Polynom1/Polynom2$, $\mathbb{R}[s]$ – множество полиномов. Матричная передаточная функция объекта представлена в виде левого взаимно-простого полиномиального разложения $W_{obj}(s) = d_l^{-1}(s)N_l(s)$, где «числитель» передаточной функции объекта $N_l(s) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}[s]$, $N_l(s) = \begin{bmatrix} s \\ 1 \end{bmatrix}$, а «знаменатель» передаточной функции объекта $d_l(s) \in \mathbb{R}[s]$, $d_l(s) = s(s-1)$. В матрично-полиномиальном представлении

$$N_l(s) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} s + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = N_1 s + N_0, \quad d_l(s) = s(s-1) = d_2 s^2 + d_1 s + d_0. \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) может быть представлено в виде

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = W_{obj}(s) e(s) = d_l^{-1}(s)N_l(s) e(s). \quad (4)$$

По выходу системы $out_2(s)$ потребуем астатизм и в целом устойчивость всей системы, в том числе по выходу $out_1(s)$.

2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Из рис. 1 видно, что блок регулирования содержит два входа $out_1(s)$ и $out_2(s)$ и один выход $reg(s)$. То есть блок регулирования, так же как и объект, неквадратный. Регуляторы представлены двумя передаточными функциями: $w_{1reg}(s) = reg_1(s)$ и $w_{2reg}(s) = reg_2(s)$. Предположим, что матричная передаточная функция регулятора выбрана в виде правого взаимно-простого полиномиального разложения

$$W_{reg}(s) = [W_{1reg}(s) \quad W_{2reg}(s)] = X_r(s)y_r^{-1}(s), \quad (5)$$

где $W_{1reg}(s), W_{2reg}(s) \in \mathbb{R}(s)$ – множество передаточных функций, $X_r(s) \in \mathbb{R}^{1 \times 2}[s]$, $y_r(s) \in \mathbb{R}[s]$.

Для удобства представления и в связи с тем, что $y_r(s)$ – скаляр, преобразуем передаточную функцию регулятора к виду $W_{reg}(s) = y_r^{-1}(s)X_r(s)$ на структурной схеме управления, приведенной на рис. 2.

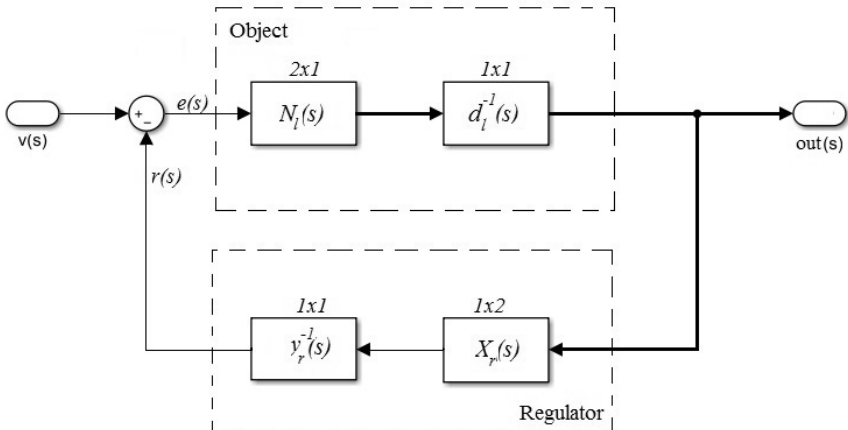


Рис. 2. Структурная схема управления

На рис. 2 показана размерность числителя и знаменателя объекта и регулятора: тонкой линией – скаляр, толстой линией – вектор.

В качестве регуляторов $reg_1(s)$, $reg_2(s)$ выбираем неправильные (попрогер) пропорционально-дифференциальные (ПД) регуляторы [7]. Реализация в матричном и полиномиальном виде: $X_r(s) = [r_1 \ r_2]s + [k_1 \ k_2] = X_1s + X_0$, $y_r(s) = y_0 = 1$. Передаточная функция регулятора приведена к виду правого полиномиального взаимно-простого разложения

$$W_{reg}(s) = X_r(s)y_r^{-1}(s) = ([r_1 \ r_2]s + [k_1 \ k_2]). \quad (6)$$

Тогда матричное описание взаимосвязи выходного значения регулятора $r(s)$ к его входному значению $[out_1(s) \ out_2(s)]^T$ будет выглядеть следующим образом:

$$reg(s) = X_r(s)y_r^{-1}(s) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = ([r_1 \ r_2]s + [k_1 \ k_2]) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Подставим уравнения (7) и (1) в (4) и получим

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = d_l^{-1}(s)N_l(s) \left(v(s) - X_r(s)y_r^{-1}(s) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} \right).$$

Раскрываем скобки и переносим второй член в левую часть:

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} + d_l^{-1}(s)N_l(s)X_r(s)y_r^{-1}(s) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = d_l^{-1}(s)N_l(s)v(s).$$

Выносим общий множитель за скобки:

$$\left(I + d_l^{-1}(s)N_l(s)X_r(s)y_r^{-1}(s) \right) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = d_l^{-1}(s)N_l(s)v(s),$$

где $I \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ – единичная матрица. Далее умножим левую и правую части уравнения на $d_l(s)$:

$$\left(d_l(s)I + N_l(s)X_r(s)y_r^{-1}(s) \right) \begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = N_l(s)v(s).$$

Выражаем выходной сигнал объекта через произведение передаточной функции на входной сигнал:

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = \left(d_l(s) I + N_l(s) X_r(s) y_r^{-1}(s) \right)^{-1} N_l(s) v(s).$$

Учитывая, что $y_r(s) y_r^{-1}(s) = 1$, преобразуем выражение к виду

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = \left(d_l(s) I y_r(s) y_r^{-1}(s) + N_l(s) X_r(s) y_r^{-1}(s) \right)^{-1} N_l(s) v(s).$$

Вынесем общий множитель $y_r^{-1}(s)$ за скобки:

$$\begin{bmatrix} out_1(s) \\ out_2(s) \end{bmatrix} = \left(d_l(s) I y_r(s) + N_l(s) X_r(s) \right)^{-1} y_r(s) N_l(s) v(s).$$

В общем виде передаточная функция замкнутой системы

$$W_{cl}(s) = \left(d_l(s) I y_r(s) + N_l(s) X_r(s) \right)^{-1} y_r(s) N_l(s).$$

Получаем характеристическую матрицу замкнутой системы (ХМЗС)

$$I d_l(s) y_r(s) + N_l(s) X_r(s) = C(s). \quad (8)$$

В связи с тем, что ХМЗС (8) имеет слагаемые второго порядка, то и желаемая характеристическая матрица замкнутой системы (желаемая ХМЗС) второго порядка

$$C(s) = C_2 s^2 + C_1 s + C_0, \quad (9)$$

где $C_i = \begin{pmatrix} c_{i1} & c_{i2} \\ c_{i21} & c_{i22} \end{pmatrix}$, $i = 0, 1, 2$.

Приравняем (8) и (9):

$$I (d_2 s^2 + d_1 s + d_0) y_r(s) + (N_1 s + N_0) (X_1 s + X_0) = C_2 s^2 + C_1 s + C_0.$$

Для решения СЛАУ в левой части оставим полиномы с неизвестными X_1 и X_0 , всё остальное перенесем в правую часть:

$$(N_1s + N_0)(X_1s + X_0) = C_2s^2 + C_1s + C_0 - I(d_2s^2 + d_1s + d_0)y_r(s).$$

Так как $y_r(s) = y_0 = 1$, то уравнение можно преобразовать к виду

$$(N_1s + N_0)(X_1s + X_0) = C_2s^2 + C_1s + C_0 - I(d_2s^2 + d_1s + d_0).$$

Переходим от полиномиального матричного описания к числовой матричной форме:

$$\begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ N_0 & N_1 \\ 0 & N_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 - d_2I \\ C_1 - d_1I \\ C_0 - d_0I \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Получена система линейных алгебраических уравнений вида $Ax = b$, где $A \in \mathbb{R}^{6 \times 2}$, $x \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $b \in \mathbb{R}^{6 \times 2}$. Если бы матрица A была квадратная и невырожденная, то задача была бы решена. В данном случае получена система из двенадцати скалярных уравнений, в то время как скалярных неизвестных всего четыре. Это говорит о ее переопределенности, что, как правило, приводит к отсутствию решения. Эта система решается с предположением, что матрица $A^T A$ имеет полный ранг и, безусловно, $rank(A)$ равен числу столбцов матрицы A .

Для решения поставленной задачи используем метод наименьших квадратов, описанный в [13, 14]. Таким образом, переходим к решению системы линейных уравнений вида $A^T Ax = A^T b$. Подставим соответствующие значения и получим

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{211} - d_2 & C_{212} \\ C_{221} & C_{222} - d_2 \\ C_{111} - d_1 & C_{112} \\ C_{121} & C_{122} - d_1 \\ C_{011} - d_0 & C_{012} \\ C_{021} & C_{022} - d_0 \end{bmatrix}.$$

Перемножим матрицы и выразим неизвестные коэффициенты:

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{211} - d_2 + C_{121} & C_{212} + C_{122} - d_1 \\ C_{111} - d_1 + C_{021} & C_{112} + C_{022} - d_0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} r_1 & r_2 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C_{211} - d_2 + C_{121} & C_{212} + C_{122} - d_1 \\ C_{111} - d_1 + C_{021} & C_{112} + C_{022} - d_0 \end{bmatrix}.$$

Согласно уравнению (3) коэффициенты полинома знаменателя принимают вид: $d_2 = 1$, $d_1 = -1$, $d_0 = 0$. Тогда параметры регулятора могут быть выражены:

$$r_1 = \frac{C_{211} - 1 + C_{121}}{2}, \quad r_2 = \frac{C_{212} + C_{122} + 1}{2},$$

$$k_1 = \frac{C_{111} + 1 + C_{021}}{2}, \quad k_2 = \frac{C_{112} + C_{022}}{2}.$$

Зададим желаемую характеристическую матрицу замкнутой системы вида $c(s) = C_2 s^2 + C_1 s + C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} s^2 + \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} s + \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$, корни которой $\{-0.4, -4.6\}$. Тогда

$$r_1 = \frac{1 - 1 + 0}{2} = 0, \quad r_2 = \frac{0 + 5 + 1}{2} = 3,$$

$$k_1 = \frac{5 + 1 + 0}{2} = 3, \quad k_2 = \frac{0 + 2}{2} = 1.$$

Передаточные функции регуляторов (6) будут выглядеть следующим образом:

$$w_{1reg}(s) = 3, \quad w_{2reg}(s) = 3s + 1. \quad (11)$$

В следующем разделе проверим работоспособность полученных регуляторов. Для этого смоделируем полученную систему в пакете программ Matlab.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Используя данные об объекте, приведенные в разделе 1 настоящей статьи, и передаточные функции полученных регуляторов (11), проверим работоспособность полученной системы на выход в заданный режим работы. Симуляцию системы будем проводить в системе Simulink пакета Matlab. Так как ПД-регулятор физически нереализуем, заменим его на реально-дифференцирующее звено и вместо (11) получим следующие передаточные функции регуляторов: $w_{1reg}(s) = 3$, $w_{2reg}(s) = \frac{3.001s + 1}{0.001s + 1}$. Для примера переходный процесс системы как реакция на единичный сигнал выглядит следующим образом (рис. 3).

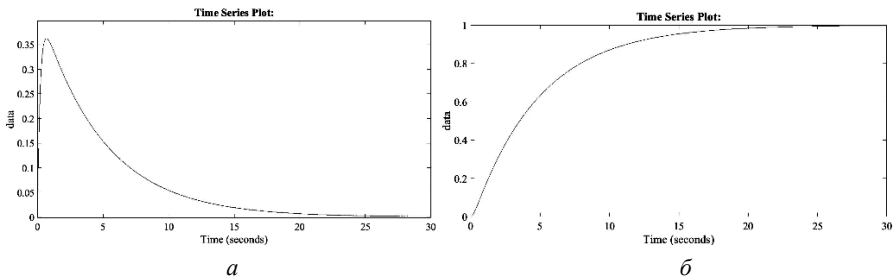


Рис. 3. Переходный процесс управления неквадратным объектом по выходу: $out_1(s)$ (а) и $out_2(s)$ (б)

Как видно из рис. 3, регулятор приводит систему в заданное положение для выхода системы $out_2(s)$ и в устойчивое положение для выходов системы $out_1(s)$ и $out_2(s)$. Перерегулирования не происходит. Однако вывод системы в заданный режим работы занимает около 25 секунд. Для ускорения вывода системы на заданный режим работы в дальнейшем планируется исследовать возможности ПД-регулятора, и в частности формирование желаемых полюсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи была продемонстрирована возможность полиномиального матричного метода синтеза регуляторов для неквадратного объекта. Блок регулирования также неквадратный и представлен П- и ПД-регуляторами.

В процессе синтеза регуляторов была получена переопределенная система линейных алгебраических уравнений. Такая система обычно не имеет решения. Для нахождения приближенного решения применен метод наименьших квадратов. Работоспособность полученных регуляторов продемонстрирована в системе Simulink пакета Matlab.

В дальнейшем планируется исследование возможности применения других регуляторов, в частности ПИ-регуляторов, которые более адекватно реагируют на возможные «шумы», присутствующие в реальных системах [15]. Кроме того, предполагается применение данного метода синтеза для неквадратных объектов более высокого порядка и с большим числом входов и выходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воевода А.А., Бобобеков К.М., Филлюшов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза для объекта с двумя входами и одним выходом // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 17–32. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-17-32.2.

2. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 716 с.

3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

4. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 646 с.

5. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: учебное пособие для вузов. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.

6. Марченко Ю.Н., Трубецкой В.С., Марченко П.Ю. К вопросу управления объектами с неравным числом управляющих и выходных переменных // Научные итоги года: достижения, проекты, гипотезы. – 2011. – № 1-1. – С. 316–322.

7. Chen C.T. Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.

8. Бобобеков К.М. Полиномиальный метод синтеза многоканальных систем посредством перехода к матричному полиномиальному представлению // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 7–25.

9. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Решение переопределенной линейной системы уравнений при полиномиальном синтезе регуляторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – С. 84–99.

10. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
11. *Воевода А.А., Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
12. *Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учебное пособие. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2011. – 464 с.
13. *Шевцов Г.С.* Линейная алгебра: теория и прикладные аспекты: учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 576 с.
14. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – Изд. 2-е, доп. и испр. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.
15. *Аникин М.К.* Выбор оптимальных параметров ПИ-регулятора // Записки Горного института. – 2004. – Т. 159, ч. 1. – С. 137–139.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: uscit@uscit.ru

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-7-20

Example of polynomial controller synthesis for a non-square object with one input and two outputs*

A.A. Voevoda¹, V.I. Shipagin²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: ucit@ucit.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department Automatics. E-mail: shipagin@mail.ru

Polynomial methods for synthesizing controllers for automatic control systems with linear objects are becoming increasingly common. The synthesis of multichannel controllers is particularly difficult, which is caused by the need to use matrix polynomial calculus. However, this approach mainly considers objects with the number of inputs equal to the number of outputs. This is due to the convenience of solving a system of linear algebraic equations in matrix polynomial calculus. In this paper, we consider a polynomial method for synthesizing regulators for a non-square object, that is, one whose number of inputs is not equal to the number of outputs. The selected system contains not only a non-square object, but also a non-square controller.

Keywords: object transfer function, control system, factorization method, polynomial synthesis, multi-channel controllers, Sylvester matrix, non-square object

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Bobobekov K.M., Filyushov V.Yu. Polinomial'nyi metod sinteza dlya ob"ekta s dvumya vkhodami i odnim vykhodom [Polynomial synthesis method for objects with two inputs and one output]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 17–32. DOI: 10.17212/2307-6879-2019- 3-4-17-32.
2. Bukov V.N. *Vlozhenie sistem. Analiticheskii podkhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem* [The attachment systems. Analytical approach to analysis and synthesis of matrix systems]. Kaluga, N.F. Bochkareva Publ., 2006. 716 p.
3. Bendat J.S., Piersol A.G. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York, Wiley, 1986 (Russ. ed.: Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh*. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.).
4. Pupkov K.A., Egupov N.D., eds. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya*. V 5 t. T. 2. *Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern control

* Received 04 October 2020.

theory. In 5 vol. Vol. 2. Statistical dynamics and the identification of automatic control systems]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 646 p.

5. Miroshnik I.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineinye sistemy* [Theory of automatic control. Linear systems: a textbook for universities]. St. Petersburg, Piter Publ., 2005. 336 p.

6. Marchenko Yu.N., Trubetskoi V.S., Marchenko P.Yu. K voprosu upravleniya ob'ektami s neravnym chislom upravlyayushchikh i vykhodnykh peremennykh [On the issue of managing objects with an unequal number of control and output variables]. *Nauchnye itogi goda: dostizheniya, proekty, gipotezy*, 2011, no. 1-1, pp. 316–322. (In Russian).

7. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

8. Bobobekov K.M. Polinomial'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh sistem posredstvom perekhoda k matrichnomu polinomial'nomu predstavleniyu [Polynomial method for the synthesis of multichannel systems by transition to matrix polynomial representation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2019, no. 1, pp. 7–25.

9. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Reshenie pereopredelennoi lineinoi sistemy uravnenii pri polinomial'nom sinteze regulyatorov [Solution of an overdetermined linear system of equations for polynomial synthesis of regulators]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2017, no. 4 (56), pp. 84–99.

10. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: polinomial'nyi metod sinteza dvukhkanal'noi sistemy [Stabilization of two-mass system: polynomial method of synthesis of two-channel system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.

11. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multichannel controllers of a given structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (51), pp. 214–218.

12. Gaiduk A.R., Belyaev V.E., P'yavchenko T.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s resheniyami v MATLAB* [Theory of automatic control in examples and problems with solutions in MATLAB]. 2nd ed., rev. St. Petersburg, Lan' Publ., 2011. 464 p.

13. Shevtsov G.S. *Lineinaya algebra: teoriya i prikladnye aspekty* [Linear algebra: Theory and applied aspects: textbook]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003. 576 p.
14. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* [Least-squares method and the observations processing theory basis]. 2nd ed., rev. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 349 p.
15. Anikin M.K. Vybór optimal'nykh parametrov PI-regulyatora [Selecting the optimal parameters of the PI controller]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2004, vol. 159, pt. 1, pp. 137–139.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Пример полиномиального синтеза регулятора для неквадратного объекта с одним входом и двумя выходами // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 4 (98). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-7-20.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Primer polinomial'nogo sinteza regulyatora dlya nekvadratnogo ob"ekta s odnim vkhodom i dvumya vykhodami [Example of polynomial controller synthesis for a non-square object with one input and two outputs]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (98), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-7-20.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ В СКАНИРУЮЩИХ ДАЛЬНОМЕРАХ*

А.Ф. УЛЯШИН¹, А.А. ВЕЛИЧКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

В последнее время стал стремительно развиваться рынок сканирующих дальнометров (иначе говоря, лидаров) в связи с новым курсом на беспилотные автомобили и необходимостью высокоточного позиционирования объектов в строительстве, геодезии, военном деле, навигации и т. п. Ведущими производителями таких сканирующих устройств на данный момент являются компании Velodyne, Ouster и Luminar. У каждой из фирм существует свой уникальный подход в создании лидара, у которого есть как плюсы, так и минусы. Сам по себе лидар представляет собой сканирующее устройство, предназначенное для получения и обработки информации об удаленных объектах за счет активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах. Другими словами, лидар – это устройство, которое с помощью лазерного излучателя обнаруживает объект, после чего луч от объекта отражается и попадает на фотоприемное устройство, которое, в свою очередь, формирует сигнал и передает его на измеритель временных интервалов. На выходе получается, в зависимости от типа лидара, двух- или трехмерное изображение сканируемого объекта в виде точек. Чем их больше, тем более четкую картину мы имеем, их количество напрямую зависит от количества лазеров и скорости обработки системы. Настоящая работа посвящена сравнительному анализу методов построения лидарных систем. Анализ проводится с целью выявления максимально точного метода измерения дальности до объекта при различных условиях. В работе предложен новый автоколебательный принцип измерения дальности, позволяющий вывести точность измерения на новый уровень.

Ключевые слова: сканирующий дальномер, лидар, сканирующее устройство, лазерный излучатель, фотоприемник, погрешность измерения, технология управления лучом, тип сканирования, длина волны, поле зрения, дальность, скорость вращения, частота дискретизации, метод измерения расстояния

* Статья получена 06 октября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время беспилотные автомобили получили очень большую популярность в силу удобства своего управления. К слову говоря, управление осуществляется в полностью автоматическом режиме, без участия человека. Всё это стало возможным благодаря системе «лидар», которая устанавливается на крышу автомобиля и сканирует окружающее пространство. Тем самым лидар вычисляет расстояние до объектов в режиме реального времени. Помимо беспилотных автомобилей, также существуют и другие применения этого устройства, например робот-пылесос. Для его правильного функционирования будет достаточно использования двухмерного лидара, так как нет необходимости в сканировании всего пространства. В беспилотных же автомобилях необходимо использование трехмерного лидара, так как препятствия могут находиться не только на поверхности, но и во всём пространстве. Помимо разделения сканирующих дальномеров по видам сканирования, существует также разделение по методам измерения расстояния до объекта. В двухмерных лидарах чаще всего используется фазовый метод измерения в силу небольших требований к расстояниям. В этих дальномерах свет лазера модулируется высокочастотным сигналом. Задержка во время распространения луча в его «полете» до объекта и обратно приводит к появлению фазового сдвига между сигналом, который используется для управления лазером и который принимается от объекта. Дальномёры такого типа также используются в промышленности, геодезии. Лазерные рулетки в большинстве своем используют как раз фазовый метод измерения расстояния. Достаточно известный в робототехнике лидар Nokuvo URG-04LX тоже является фазовым. Специализированные 3D-сенсоры (range imaging camera) тоже часто используют этот метод. Преимуществами такого принципа измерения являются высокая точность измерения расстояния (единицы миллиметров и меньше), но она может падать при уменьшении отношения сигнал/шум, а также возможность сделать малогабаритное устройство. К недостаткам относится тот факт, что лазер работает постоянно, поэтому приходится ограничивать его мощность. Это приводит к тому, что на больших расстояниях принимаемый сигнал оказывается довольно низким – это сказывается на точности дальномёра. Помимо этого, электроника такого дальномёра относительно сложная, а также сложно получить высокую скорость измерения, которая как раз и необходима в беспилотных автомобилях. Для измерения больших дальностей применяют дальномёры, использующие импульсный принцип измерения расстояния, благодаря этому обеспечивается необходимая точность. Также такие дальномёры называют «времяпролетными», Time-Of-Flight (TOF). Они используют «классический», наиболее известный большинству метод измерения расстояния: дальномер

измеряет время «полета» вспышки света до объекта и обратно. Несмотря на кажущуюся простоту метода, из-за высокой скорости света довольно сложно сделать дальномер, способный точно измерять расстояние. Дальномеры такого типа активно используют военные, а также они используются в геодезии, дистанционном зондировании Земли, промышленности, автономных автомобилях, их устанавливают на беспилотники – т. е. они встречаются везде, где требуется измерение больших расстояний. У этих дальномеров следующие преимущества: лазер используется в импульсном режиме, что позволяет формировать импульсы сверхбольшой мощности (более МВт), за счет этого можно измерять очень большие расстояния, сделать малогабаритное устройство. Датчики типа VL53L0X используют именно этот метод. Можно получить очень высокую скорость измерений – 100 кГц и более. Но есть и недостатки: сложно измерить расстояние с высокой точностью ($< \pm 0.5$ м). Так же как и у фазового дальномера, электроника такого дальномера относительно сложная. Более усовершенствованной версией импульсного лидара является лидар с новым автоколебательным принципом измерения расстояния до объекта, который сочетает в себе лучшие качества как фазового, так и импульсного дальномера [1]. О нем будет рассказано в разделе 4.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Лидар – это технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах. Лидар как прибор представляет собой активный дальномер оптического диапазона.



Рис. 1. Принцип действия лидара

В основе устройства лидара лежит лазерный излучатель и фотоприемное устройство. Принцип действия достаточно прост. Объект (поверхность) освещается коротким световым импульсом, и измеряется время, через которое сигнал вернется к источнику. Точнее сказать, после того как луч отразится от

объекта, он попадает на фотоприемное устройство (рис. 1), после этого вычисляется время прохождения всего пути. При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды (атмосфере, космосе, воде) дальность до объекта рассчитывается по формуле (1), расчет производится с учетом того, что луч проходит двойное расстояние:

$$L = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; Δt – интервал времени между моментами посылки и приема излучения зондирующего импульса; n – показатель преломления среды распространения для используемой длины волны излучения.

Из этой формулы следует, что для обеспечения меньшей погрешности измерения дальности до объекта нужно обеспечить постоянную скорость распространения излучения в слое среды и его прямолинейность. Данные условия достаточно сложно выполнимы. Для примера: при нахождении лидара на воздушном судне и сканировании пространства на суше необходимо учитывать явление рефракции, которое приводит к искривлению оптического пути лазерного излучения. При сканировании в зонах турбулентности оптический путь лазерного излучения также искажается, т. е. не является прямолинейным.

В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических целей, световые волны подвержены рассеянию в любых средах, в том числе в воздухе, поэтому возможно не только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность рассеивания света в прозрачных средах. Возвращающийся отраженный сигнал проходит через ту же рассеивающую среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределенной оптической среды – достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами [1, 2].

Основными факторами, влияющими на погрешность измерения расстояния до объекта, являются следующие:

- систематическая погрешность, обусловленная различным временем задержки сигнала в каналах фиксации излучаемого и принимаемого импульсов;
- погрешность, обусловленная конечной дискретностью измерителя временных интервалов;
- погрешность временной фиксации импульсов излучения.

С первым видом погрешности, обусловленной разным временем задержки сигнала в каналах фиксации старт- и стоп-импульсов, можно бороться методом минимизации. Минимизация возможна при схемной компенсации, а при

схеме совмещенного старта, когда старт- и стоп-импульсы подаются на один приемник излучения, она исчезает полностью. В системах без совмещенного старта эту систематическую погрешность можно учесть с помощью многократного измерения калиброванной дистанции.

Конечная дискретность измерителя временных интервалов при несинхронности его внутренней тактовой частоты с моментами излучения зондирующего импульса можно оценить по дисперсии связанной с ней погрешности (2):

$$D = \frac{\Delta d^2}{6}, \quad (2)$$

где Δd – дискретность измерителя временных интервалов в единицах дальности.

При использовании тактового генератора для измерителя временных интервалов с частотой 150...300 МГц погрешность, вызванная дискретностью, составит 0,1...0,2 м.

Погрешность временной фиксации импульсов излучения в основном связана с приемом отраженного от объекта лазерного импульса. Мощность сигнала может изменяться на несколько порядков в зависимости от дальности до объекта и его коэффициента отражения, состояния слоя среды распространения излучения. Помимо этого, на сигнал накладываются шумы и помехи приемного канала и канала распространения. Эти факторы приводят к серьезным искажениям формы принятого сигнала и, как следствие, к погрешности фиксации момента прихода данного импульса пороговым устройством (рис. 2).

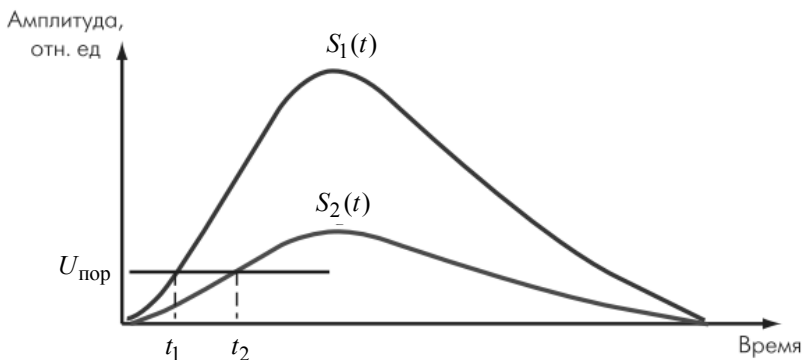


Рис. 2. Временная фиксация импульсов по уровню

Наиболее распространенным методом временной привязки принятого импульса излучения является метод фиксации пороговым устройством, чаще всего компаратором [2]. В таком случае момент прихода импульса излучения фиксируется при достижении порога срабатывания и зависит как от длительности фронта импульса, так и от остальных параметров, таких как отражающие свойства объекта, состояние атмосферы и т. д., которые, в свою очередь, искажают форму принятого сигнала. При неизменности формы сигнала разброс момента фиксации равен длительности фронта импульса, по этой причине к источнику лазерного излучения в высокочастотных дальномерах выдвигают требования минимальности длительности импульса и максимизации добротности. Наиболее распространенными на данный момент являются лазеры с длительностью импульса 10 нс и меньше. При высоких требованиях к точности фиксации импульса используют методы фиксации максимума импульса и точки пересечения нуля производной. Указанные методы относительно легко реализуются и обеспечивают высокую точность фиксации, но они имеют эффективность только в линейной области изменения сигнала. Как было показано выше, лазерные дальномерные методы основаны на определении длительности времени, в течение которого импульсный сигнал проходит двойное расстояние от дальномера до отражателя. Лазерные дальномеры должны измерять дальности от долей метра и вплоть до десятков километров, что соответствует измерительному временному интервалу от наносекунд до миллисекунд. Время измерения при этом неизменно и определяется оператором. Это значительно упрощает получение удовлетворительного устойчивого разрешения и снижает требования к ИВИ.

Разрешение ИВИ должно быть намного выше, чем разрешение всей дальномерной системы в целом, определяемое уровнем шумов и временем измерения. Также важными параметрами измерения временных интервалов являются линейность и стабильность [3]. Линейность вместе с флуктуационной погрешностью устройства временной привязки определяет абсолютную точность дальномерной системы.

Задача настоящей работы состоит в исследовании каждого из методов измерения расстояния в лазерных дальномерах с целью выявления наиболее точного метода, удовлетворяющего требованиям современных беспилотных автомобилей. В работе предложен новый способ измерения расстояния, разработанный специально для лидаров.

2. ЛАЗЕРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Лазерные фазовые дальномеры (ЛФД) являются менее универсальными, нежели импульсные лидары, по причине того, что обладают значительно меньшей дальностью измерения. С другой стороны, ЛФД обладают значи-

тельно большей точностью. Это отличие объясняется тем, что в ЛФД источником излучения является непрерывный полупроводниковый лазер либо светодиод, излучение которых промодулировано одним или несколькими гармоническими сигналами.

Принцип действия ЛФД следующий: определение расстояния происходит путем сравнения фазы модулирующего сигнала на выходе с приемника излучения с фазой опорного сигнала. При этом расстояние, проходимое световой волной за время t , вычисляется следующим образом:

$$l = ct, \quad (3)$$

где c – скорость света.

За то же время фаза модулированного лазерного излучения, прошедшего путь от источника дальномера до объекта и обратно, изменится на величину

$$\varphi = 2\pi f_m t, \quad (4)$$

где f_m – частота модуляции излучения.

Отсюда следует, что дальность до объекта можно определить по следующей формуле:

$$l = c \frac{\varphi}{2\pi f_m}. \quad (5)$$

При измерении фазы возникает погрешность, которая определяется по формуле:

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m}. \quad (6)$$

На рис. 3 представлена функциональная схема двухчастотного ЛФД, реализующая классический принцип действия. На выходе генераторов формируется два сигнала в виде меандров с частотой f_{1m} и f_{2m} . Эти сигналы логически перемножаются и подаются на драйвер лазера, который, в свою очередь, модулирует ток накачки полупроводникового лазера. Помимо этого, сигналы также поступают через узкополосные фильтры на два фазовых детектора в качестве опорных напряжений [3, 4].

После отражения от зондируемого объекта модулированное одновременно двумя частотами лазерное излучение с измененной фазой регистрируется ФПУ. Напряжение с выхода ФПУ усиливается широкополосным усилителем и подается на узкополосные активные фильтры, настроенные на частоты f_{1m} и f_{2m} . Таким образом, из принятого сигнала сложной формы выделяются две гармоники, которые поступают на рабочие входы соответствующих фазовых детекторов.

На выходах фазовых детекторов формируются напряжения, пропорциональные смещению фаз φ_1 и φ_2 , которые впоследствии оцифровываются с помощью АЦП. Результатом оцифровки сигнала являются два двоичных числа с разрядностями b_1 и b_2 .

Первое из чисел является грубо определенной дальностью, а второе число – уточнением дальности до значения требуемой погрешности. Для того чтобы получить итоговый результат, необходимо «сшить» числа b_1 и b_2 в одно число с разрядностью $b = b_1 + b_2$, которое и будет соответствовать дальности до объекта [5].

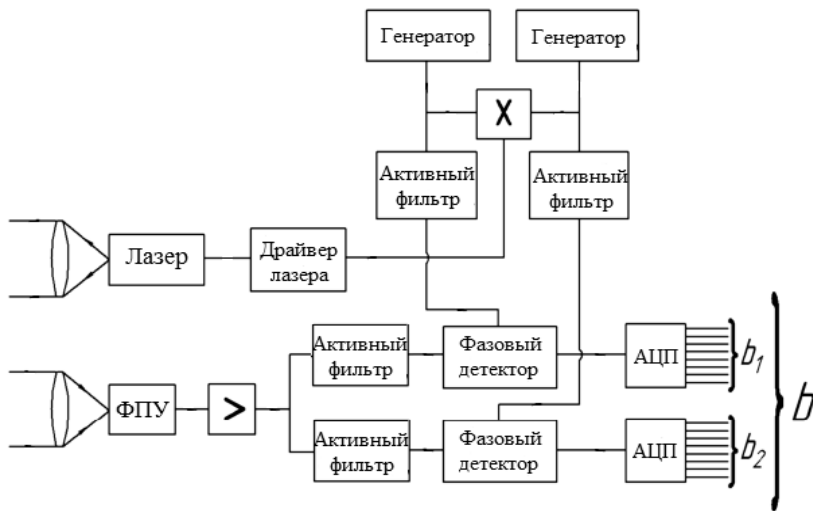


Рис. 3. Функциональная схема лазерного фазового дальномера

В процессе проектирования лазерных фазовых дальномеров (ЛФД) проявляется целый ряд трудностей, которые препятствуют достижению неболь-

шой погрешности (менее 0,5 мм) даже в случаях использования многочастотной схемы измерения [6]. К основным трудностям относятся следующие:

- необходимость в генераторе, обладающем хорошей стабильностью в большом температурном диапазоне ($\leq 0,1\%$), малым фазовым джиттером (≤ 5 пс) и небольшими габаритами;

- ограниченные возможности использования СЛ-компонентов вследствие значительных фазовых флуктуаций, вносимых этими компонентами;

- необходимость использования нескольких частот модуляции лазерного излучения, включая высокие частоты (более 300 МГц), имеющих жесткую фазовую связь;

- зависимость параметров электронных компонентов схемы ЛФД от температуры.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что применение ЛФД в качестве лидара не очень целесообразно в силу сложности устройства. По этой причине курс был взят на импульсные дальномеры.

3. ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Принцип действия лазерных импульсных дальномеров (ЛИД) состоит в измерении интервала времени между моментом излучения зондирующего лазерного моноимпульса (старт-импульс) и моментом приема излучения (стоп-импульс). Источником излучения в таких приборах является импульсный лазер (обычно твердотельный или полупроводниковый), излучение которого коллимируется с помощью оптической формирующей системы. При формировании лазерного импульса часть лазерного излучения отводится (например, с помощью светоделителя) на фотоприемное устройство ФПУ1. Отраженное от объекта излучение попадает в приемный канал, состоящий из приемного объектива, ФПУ 2 (приемника излучения) и усилителя сигнала (рис. 4). Измеритель временных интервалов (ИВИ) начинает работу в момент излучения лазерного импульса по сигналу ФПУ1 и завершает ее в момент приема отраженного излучения по сигналу ФПУ2, выдавая цифровой код полученного результата. Блок синхронизации и управления осуществляет интерпретацию и повышение точности полученных результатов, формирует сигнал на индикаторе, а также принимает команды органов управления [7].

При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды (атмосфере, космосе, воде) дальность до объекта можно рассчитать с помощью следующего выражения (при этом учитывается, что лазерное излучение проходит двойное расстояние):

$$L = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (7)$$

где c – скорость света в вакууме; Δt – интервал времени между моментами посылки и приема излучения зондирующего импульса; n – показатель преломления среды распространения для используемой длины волны излучения.

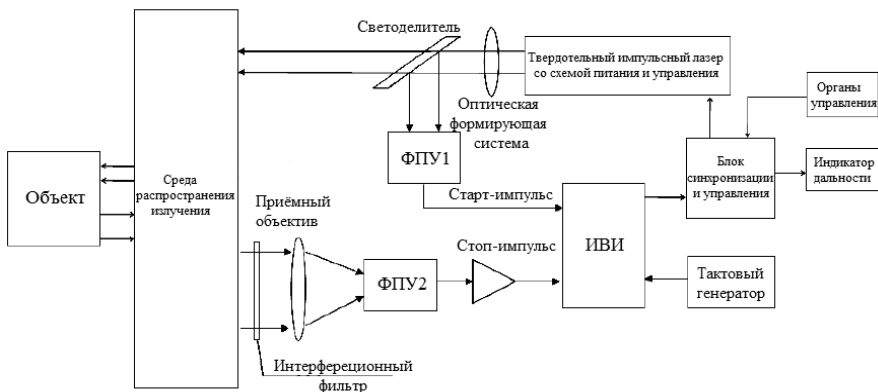


Рис. 4. Функциональная схема лазерного импульсного дальномера

Основным методом построения ЛИД является метод непосредственного счета [8]. Сущность метода заключается в представлении измеряемого интервала, задаваемого двумя импульсами – старт и стоп – в виде последовательности некоторого числа счетных импульсов с известным образцовым периодом следования. По числу счетных импульсов судят о размере измеряемого интервала (рис. 5). Измеряемый интервал времени, заданный старт- и стоп-импульсами, преобразуется в прямоугольный импульс, который «вырезает» из периодической последовательности счетных импульсов участок, содержащий m импульсов. Значение измеряемого интервала времени определяется как $T_x = mT_{сч}$.

Структурная схема ИВИ, реализующая этот метод, приведена на рис. 6. Между генератором счетных импульсов и счетчиком включен временной селектор, через который счетные импульсы проходят на счетчик только тогда, когда на него воздействуют стробирующий импульс длительностью T_x , сформированный блоком формирования из старт- и стоп-импульсов. Такой метод отличается хорошей линейностью и большим динамическим диапазоном.

Собственное разрешение метода непосредственного счета составляет $\pm T_{сч}$, например, 5 нс при частоте следования счетных импульсов 200 МГц, что соответствует расстоянию $\pm 0,75$ м. Разрешение можно улучшить посредством усреднения, но одновременно с этим увеличивается и время измерения [9].

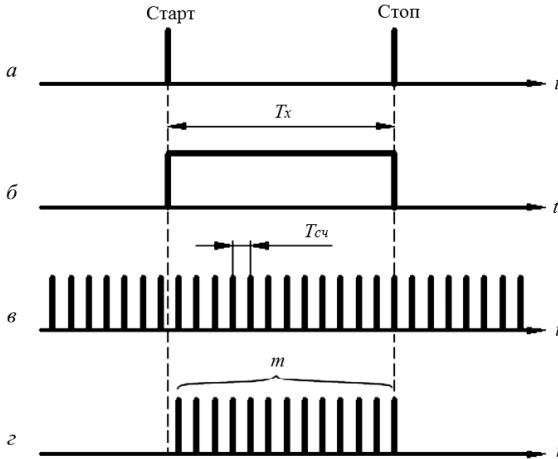


Рис. 5. Диаграммы измерения временных интервалов методом непосредственного счета импульсов:

а – старт- и стоп-импульсы; б – прямоугольный импульс;
 в – периодическая последовательность счетных импульсов;
 г – m вырезанных импульсов

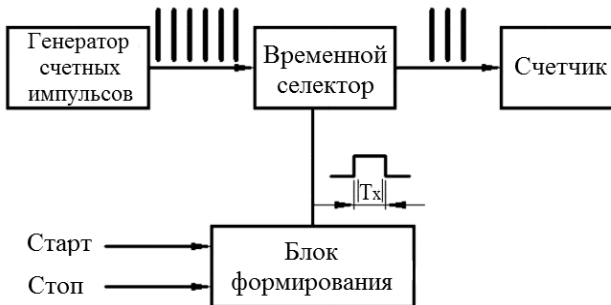


Рис. 6. Структурная схема измерения временных интервалов методом непосредственного счета импульсов

Метод импульсной лазерной локации широко используют при создании дальномеров, высотометров, лидаров, систем 3D-регистрации и др. Для большинства приложений важно реализовать предельные возможности дальномеров по дальности действия и точности при минимально возможной массе и стоимости приборов [10]. По этой причине существует необходимость в техническом решении, которое позволяет существенно повысить точность дальномеров без значительного усложнения их конструкции. Такое решение предложено в следующем разделе.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Автоколебательный метод построения дальномера будет наиболее актуален для применения его в лидарных системах. В последнее время спрос на такие системы возрос в разы, так как их устанавливают на беспилотные автомобили. Основой построения такого устройства является быстрый и точный измеритель дальности до отражающей поверхности. При этом используются два основных метода измерения:

- прямое измерение;
- модуляция сигнала с последующим гетеродированием (на низкочастотный сигнал переносится фаза высокочастотного).

Второй метод обладает высокой точностью, но при этом относительно медленный. Первый же метод хорошо работает только на большом расстоянии, когда частоты дискретизации таймера хватает для обеспечения точности измерения. Для лидара, обычно работающего в диапазоне от 1 до 100 м, потребуется частота от 16 ГГц, что почти на два порядка выходит за возможности программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Для корректной работы недорогой элементной базы потребуется понизить частоты минимум в 100 раз.

В связи с вышеперечисленными трудностями предлагается техническое решение, при котором лазерный луч в процессе измерения расстояния пробегает измеряемый интервал более одного раза (рис. 7).

Период прохождения луча будет состоять из времени, требуемого для прохождения цепочки от фотоприемника до лазера, и удвоенного времени распространения света до отражающего объекта. Если сформировать измерительный интервал как целое число периодов автогенерации, то точность определения одного периода будет равна точности измерения интервала (в квантах частоты дискретизации), деленной на число периодов сигнала автогенерации. Фактически этот процесс эквивалентен увеличению частоты дискретизации измерителя частоты в такое же количество раз. Для расстояния в один метр ожидаемая частота автогенерации будет примерно 20...30 МГц, основной вклад будет вносить задержка в аппаратуре. Для расстояния в 100 м ожида-

ется частота около 1 МГц. Лидар должен выдавать точки через одинаковые промежутки времени, вот это время и будет измерительным интервалом. Типовым требованием для лидарных систем является разрешающая способность 0.1° , 3600 точек на одну траекторию сканирования при периоде повторения 25 Гц. Время измерения одной точки будет составлять около 10 мкс (90 кГц + служебный интервал). Недорогой многоканальный частотомер имеет частоту дискретизации 200 МГц и интервал в 10 мкс измеряет с точностью в 0.05 %. Точность измерения любого расстояния от 1 до 1500 м будет тоже около 0.05 % без учета влияния шумов.

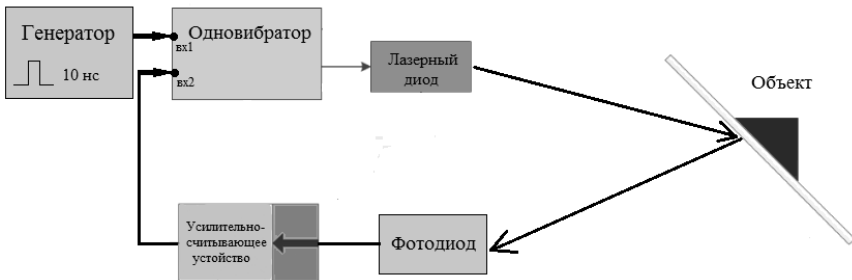


Рис. 7. Структурная схема дальномера с автоколебательным принципом измерения расстояния

Для компенсации влияния нестабильности аппаратуры (время задержки) необходимо сгенерировать служебные импульсы отрицательной полярности (рис. 8), измерительные импульсы положительной полярности и с их помощью постоянно контролировать параметры аппаратуры.

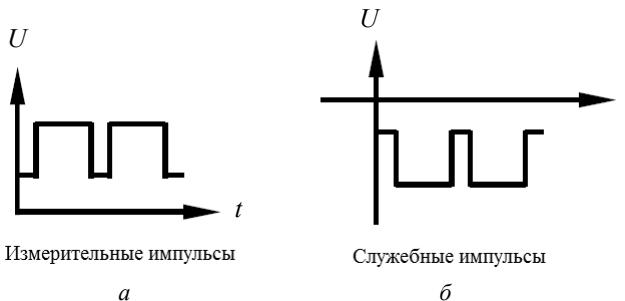


Рис. 8. Классификация импульсных сигналов по полярности:

a – измерительные импульсы положительной полярности; *б* – служебные импульсы отрицательной полярности

Для измерения большого числа горизонтальных траекторий существует возможность сделать несколько одновременно работающих пар лазер–фотоприемник (рис. 9). Разделить их можно либо пространственно, т. е. чтобы они смотрели в разные стороны, либо в частотном диапазоне, модулируя излучаемую посылку высокочастотным сигналом. Для обеспечения работы нескольких лидаров в одном месте также требуется произвести модулирование посылки различными частотами, но при этом аппаратура существенно усложняется.

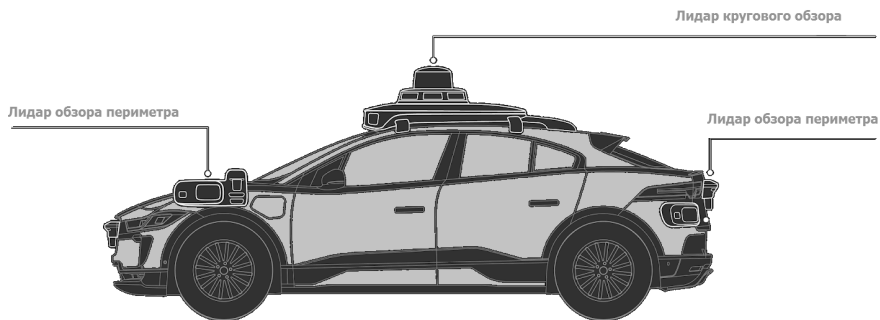


Рис. 9. Расположение лидаров в беспилотном автомобиле

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в настоящей работе метод позволяет обеспечить необходимые характеристики лидарных систем и в дальнейшем использовать их в беспилотных автомобилях. Проведен сравнительный анализ методов построения сканирующих дальномеров, применяющихся в настоящее время, и был определен наиболее удачный способ достижения высокого значения точности измерения расстояния, а именно способ построения, основанный на импульсном методе измерения дальности до объекта. Выбор в его пользу был сделан по причине возможности измерения больших расстояний, простоты реализации в интегральном исполнении и других многочисленных преимуществ. Также указанный метод был усовершенствован и адаптирован под лидарные системы. Предложенный подход может применяться при создании дальномеров, высотометров, лидаров, систем 3D-регистрации и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазерная дальнометрия / под ред. В.П. Васильева, Х.В. Хинрикус. – М.: Радио и связь, 1995. – 256 с.
2. *Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Карасик В.Е.* Приемопередающие устройства лазерных локационных изображающих систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 84 с.
3. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учебное пособие / под ред. В.Е. Карасика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 92 с.
4. Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальномерах / Б.О. Берников, В.Б. Бокшанский, М.В. Вязовых, С.В. Федоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2012. – № 9 (9).
5. *Белов И.Ю.* Физические основы оптической дальнометрии: учебно-методическое пособие. – Казань: КГУ, 2009. – 72 с.
6. *Попов Л.Н., Фролкин В.Т.* Импульсные устройства: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Советское радио, 1980. – 547 с.
7. *Грицевский П.М., Мамченко А.Е., Степенский Б.М.* Основы автоматики, импульсной и вычислительной техники: учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1987. – 632 с.
8. *Якубовский С.В.* Аналоговые и цифровые интегральные схемы: справочник. – М.: Советское радио, 2008. – 336 с.
9. *Голубев А.Н.* Приборы и методы электронной дальнометрии и тахеометрии. – М.: Недра, 1991. – 249 с.
10. *Poujouly S., Journet B.* A twofold modulation frequency laser range finder // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2002. – Vol. 4 (6). – P. S356–S363.

Уляшин Александр Федорович, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет 3 научные публикации. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

Величко Александр Андреевич, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет более 50 научных публикаций. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-21-37

Study of methods for measuring distances in scanning range*

A.F. Ulyashin¹, A.A. Velichko²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student of the department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, professor of the department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

Recently, the market for scanning rangefinders, in other words, lidars, has begun to develop rapidly due to the new course for unmanned vehicles and the need for high-precision positioning of objects in construction, geodesy, military Affairs, navigation, etc. The leading manufacturers of such scanning devices are currently Velodyne, Ouster and Luminar. Each company has its own unique approach to creating lidar, which has both pros and cons. Lidar itself is a scanning device designed to receive and process information about remote objects using active optical systems that use the phenomena of light absorption and scattering in optically transparent media. In other words, a lidar is a device that uses a laser emitter to detect an object, after which the beam from the object is reflected and hits the photodetector, which, in turn, generates a signal and transmits it to the time interval meter. The output is a two- or three-dimensional image of the scanned object in the form of dots, depending on the type of lidar. The more of them, the clearer the picture we have, their number directly depends on the number of lasers and the processing speed of the system. This work is devoted to a comparative analysis of methods for constructing lidar systems. The analysis is carried out in order to identify the most accurate method of measuring the distance to an object under various conditions, and a new self-oscillating principle of distance measurement is proposed, which allows you to bring the measurement accuracy to a new level.

Keywords: scanning rangefinder, lidar, scanning device, laser emitter, photodetector, measurement error, beam control technology, scanning type, wavelength, field of view, range, rotation speed, sampling rate, distance measurement method

REFERENCES

1. Vasil'ev V.P., Khinrikus Kh.V., eds. *Lazernaya dal'nometriya* [Laser rangefinder]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1995. 256 p.
2. Baryshnikov N.V., Bokshanskii V.B., Karasik V.E. *Priemoperedayushchie ustroystva lazernykh lokatsionnykh izobrazhayushchikh sistem* [Transceiver devices of laser location imaging systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 84 p.
3. Karasik V.E., ed. *Lazernye pribory i metody izmereniya dal'nosti* [Laser devices and methods for measuring range]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 92 p.

* Received 06 October 2020.

4. Bernikov B.O., Bokshanskiy V.B., Vyazovykh M.V., Fedorov S.V. Metody povysheniya tochnosti izmereniya dal'nosti v lazernykh fazovykh dal'nomerakh [Methods of higher range measuring accuracy in laser phase rangers]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*, 2012, NO. 9 (9).
5. Belov I.Yu. *Fizicheskie osnovy opticheskoi dal'nometrii* [Physical bases of optical rangefinder]. Kazan', KSU Publ., 2009. 72 p.
6. Popov L.N., Frolkin V.T. *Impul'snye ustroystva* [Pulsed devices]. 3rd ed. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 547 p.
7. Gritsevskii P.M., Mamchenko A.E., Stepenskii B.M. *Osnovy avtomatiki, impul'snoi i vychislitel'noi tekhniki* [Fundamentals of automation, pulse and computer technology]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987. 632 p.
8. Yakubovskii S.V. *Analogovye i tsifrovye integral'nye skhemy* [Analog and digital integrated circuits]. Handbook. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 2008. 336 p.
9. Golubev A.N. *Pribory i metody elektronnoi dal'nometrii i takheometrii* [Devices and methods of electronic rangefinder and tacheometry]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 249 p.
10. Poujouly S., Journet B. A twofold modulation frequency laser range finder. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, vol. 4 (6), pp. S356–S363.

Для цитирования:

Ульяшин А.Ф., Величко А.А. Исследование методов измерения расстояния в сканирующих дальномерах // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 4 (99). – С. 21–37. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-21-37.

For citation:

Ulyashin A.F., Velichko A.A. Issledovanie metodov izmereniya rasstoyaniya v skaniruyushchikh dal'nomerakh [Study of methods for measuring distances in scanning range]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (99), pp. 21–37. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-21-37.

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 62-791.4

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ***

А.Ф. УЛЯШИН¹, А.А. ВЕЛИЧКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу современных интегральных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). На данный момент ряд зарубежных компаний, таких как Analog Devices, Texas Instruments и Microchip, выпускают АЦП в интегральном исполнении. Каждый производитель использует собственную методику реализации устройства. Основной задачей таких устройств является преобразование напряжения в двоичный код. АЦП применяются везде, где требуется принимать аналоговый сигнал и обрабатывать его в цифровой форме. Примерами могут служить такие области применения, как средства связи и телекоммуникаций, различные радиотехнические системы и измерительная техника. Очень важными характеристиками такой аппаратуры является динамический диапазон, простота реализации и быстродействие. Средства АЦП постоянно совершенствуются, что ведет к увеличению быстродействия преобразователей и полосы частот преобразуемых сигналов, увеличению динамического диапазона, чувствительности и точности АЦП. Значительный интерес к быстродействию АЦП с большим динамическим диапазоном объясняется тем, что в подавляющем большинстве телекоммуникационных и радиотехнических систем всё чаще применяются схемы прямого преобразования сигнала без промежуточного преобразования частоты. Также получили свое развитие и широкополосные приложения. Основным требованием в этих приложениях является высокая чувствительность и широкий динамический диапазон преобразователя для одновременной регистрации сильных и слабых сигналов. В настоящей работе проведен сравнительный анализ основных видов АЦП, предложенных на рынке, с целью выявления наиболее оптимального метода их построения для использования в современной аппаратуре.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, быстродействие, динамический диапазон, чувствительность, широкополосность, аналоговый сигнал, цифровой сигнал, системы телекоммуникации

* Статья получена 07 октября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время цифровая обработка сигналов практически полностью проникла в такие области применения, как средства связи и телекоммуникаций, различные радиотехнические системы и измерительная техника. Ключевым превосходством цифровых средств сбора и обработки данных в сравнении с аналоговыми является возможность создания в рамках единственной аппаратной платформы набора устройств, позволяющих изменять выполняемые функции путем обновления программного обеспечения. Но из-за того, что физические явления имеют аналоговый характер, одной из важнейших и неотъемлемых задач современной цифровой техники является преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму. Именно поэтому развитие и увеличение областей использования цифровых систем обработки сигналов невозможно без развития систем аналого-цифрового преобразования [1].

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). Базовым элементом любого АЦП является аналоговый компаратор.

Аналоговый компаратор – электронная схема, которая сравнивает два напряжения и формирует цифровой сигнал, показывающий, какой из них имеет большее значение. Аналоговый компаратор имеет в своем составе два входа и один выход, которые можно условно обозначить как U_+ , U_- и U_0 соответственно.

Напряжение U_{REF} называют опорным. Иллюстрация работы аналогового компаратора представлена на рис. 1.

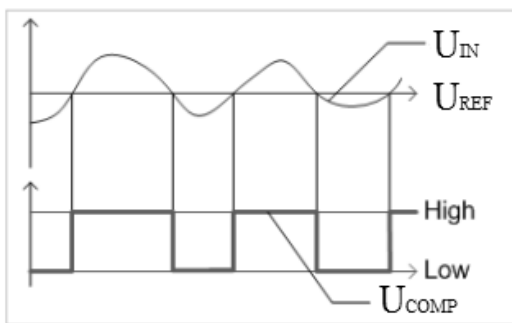


Рис. 1. Работа аналогового компаратора

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае микросхему АЦП можно представить в виде блока (рис. 2), в состав которого входит один аналоговый вход, один или два входа для подачи опорного (образцового) напряжения, а также цифровые выходы для выдачи кода, соответствующего текущему значению аналогового сигнала.

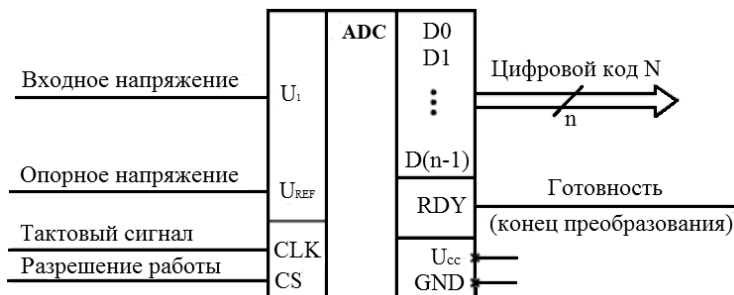


Рис. 2. Микросхема АЦП

Часто микросхема АЦП имеет также вход для подачи тактового сигнала CLK , сигнал разрешения работы CS и сигнал, указывающий о готовности выходного цифрового кода RDY . На микросхему подается одно или два питающих напряжения и общий провод. В общем и целом микросхемы АЦП сложнее, чем микросхемы ЦАП, их разновидностей заметно больше, по этой причине сформулировать для них общие принципы применения сложнее. Опорное напряжение АЦП определяет диапазон входного напряжения, в котором производится преобразование. Оно может быть как постоянным, так и допускать изменение в некоторых пределах. Иногда предусматривается подача на АЦП двух опорных напряжений с разными знаками, тогда АЦП способен работать как с положительными, так и с отрицательными входными напряжениями.

Выходной цифровой код N (n -разрядный) однозначно соответствует уровню входного напряжения. Код может принимать $2n$ значений, т. е. АЦП может различать $2n$ уровней входного напряжения. Количество разрядов выходного кода n является важнейшей характеристикой АЦП. По наступлению готовности выходного кода выдается сигнал окончания преобразования RDY , по которому внешнее устройство может читать код N .

Управляется работа АЦП тактовым сигналом CLK , который задает частоту преобразования, то есть частоту выдачи выходных кодов. Максимальная тактовая частота – второй важнейший параметр АЦП. В ряде микросхем присутствует встроенный генератор тактовых сигналов, поэтому к их выводам подключается кварцевый генератор или конденсатор, который задает частоту преобразования. Сигнал CS разрешает работу микросхемы.

Выпускается огромное множество самых различных АЦП, которые отличаются скоростью работы (частота преобразования от сотен килогерц до сотен мегагерц), разрядностью (от 6 до 24), допустимыми диапазонами входного сигнала, величинами погрешностей, уровнями питающих напряжений, методами выдачи выходного кода (параллельный или последовательный), другими параметрами.

Обычно микросхемы с большим количеством разрядов имеют невысокое быстродействие, а наиболее быстродействующие микросхемы имеют небольшое число разрядов. Область применения любой микросхемы АЦП во многом определяется использованным в ней принципом преобразования, поэтому необходимо знать особенности этих принципов. Для выбора и использования АЦП необходимо пользоваться подробными справочными данными от фирмы-производителя.

В качестве базового элемента любого АЦП используется компаратор напряжения, который сравнивает два входных аналоговых напряжения и в зависимости от результата сравнения выдает выходной цифровой сигнал – нуль или единицу. Компаратор работает с большим диапазоном входных напряжений и имеет высокое быстродействие [2].

2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЦП

Структурная схема АЦП параллельного типа показана на рис. 3. В данной схеме используются логарифмические и антилогарифмические усилители. Схема обеспечивает логарифмирование входных сигналов X и Y с их последующим суммированием и потенцированием (антилогарифмированием) этой суммы. В результате по законам логарифмирования получается сигнал, пропорциональный произведению двух входных сигналов [3].

В большинстве высокоскоростных осциллографов и некоторых высокочастотных измерительных приборах используют параллельные АЦП из-за того, что они могут обеспечить высокую скорость преобразования сигналов. Зачастую параллельные АЦП имеют разрешение до восьми разрядов, но встречаются также и 10-разрядные версии.

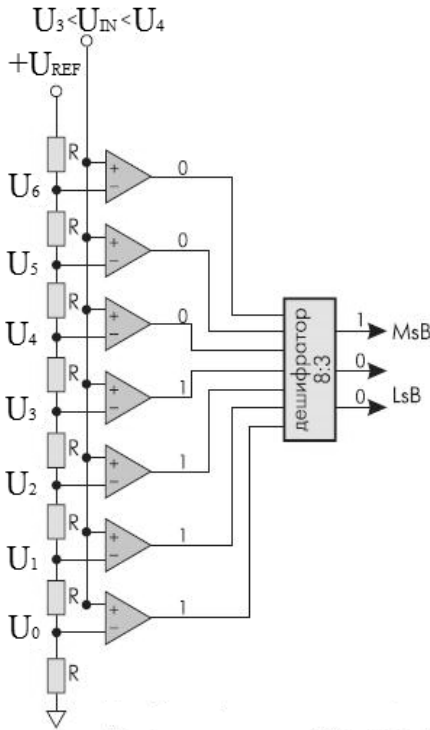


Рис. 3. АЦП параллельного преобразования

На рис. 3 изображена упрощенная блок-схема трехразрядного параллельного АЦП. Здесь используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением. Такое опорное напряжение для каждого компаратора формируется на встроенном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда (*LSB*), и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $U_{REF} / 2^3$. В результате для трехразрядного АЦП требуется $(2^3 - 1)$ или семь компараторов. А, например, для восьмиразрядного параллельного АЦП потребуется уже 255 (или $(2^8 - 1)$) компараторов.

С увеличением входного напряжения компараторы последовательно устанавливают свои выходы в логическую единицу вместо логического ну-

ля, начиная с компаратора, отвечающего за младший значащий разряд. Можно представить преобразователь как ртутный термометр: с ростом температуры столбик ртути поднимается. На рис. 3 входное напряжение находится в интервале между U_3 и U_4 . Таким образом, 4 нижних компаратора имеют на выходе «1», а верхние три компаратора – «0». Дешифратор преобразует $(2^3 - 1)$ -разрядное цифровое слово с выходов компараторов в двоичный трехразрядный код.

Параллельные АЦП – достаточно быстрые устройства, но они имеют свои недостатки. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их нецелесообразно использовать в приложениях с батарейным питанием [4].

Громоздкость структуры параллельного АЦП приводит к тому, что в некоторых АЦП применяется смешанный параллельно-последовательный принцип. Это несколько снижает быстродействие подобного АЦП по сравнению с обычным параллельным АЦП, но зато позволяет получить большое число разрядов, не увеличивая количество компараторов до $(2^n - 1)$.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ АЦП

Когда требуется получить разрешение 12, 14 или 16 разрядов и отсутствует необходимость в высокой скорости преобразования, а ключевыми факторами являются низкая цена и небольшое энергопотребление, то в таких случаях применяют АЦП последовательного типа (рис. 4). Этот тип АЦП больше всего можно встретить в различных измерительных приборах и системах сбора данных. На данный момент АЦП последовательного типа имеют возможность измерять напряжение с точностью до 16 разрядов с частотой дискретизации от 1×10^3 отсчетов в секунду до 1×10^6 отсчетов в секунду.

В последовательном АЦП входное напряжение последовательно сравнивается одним единственным компаратором с несколькими эталонными уровнями напряжения, и в зависимости от результатов сравнения формируется выходной код. На один вход компаратора подается входное напряжение, а на другой вход – эталонное напряжение, ступенчато изменяющееся во времени. Выходной сигнал компаратора подается на вход регистра последовательных приближений, тактируемого внешним тактовым сигналом. Выходной код регистра последовательных приближений поступает на ЦАП, который из опорного напряжения формирует изменяющееся эталонное напряжение.

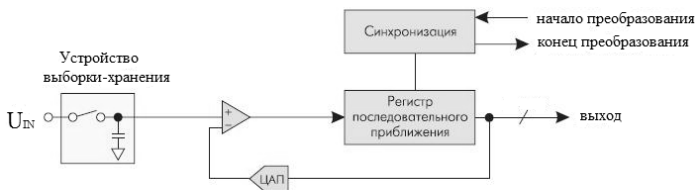


Рис. 4. АЦП последовательного типа

Работа АЦП последовательного приближения имеет особенность, связанную с переходными процессами во внутреннем ЦАП. В теории напряжение на выходе ЦАП для каждого из N внутренних тактов преобразования должно устанавливаться за одинаковый промежуток времени. На самом деле этот промежуток в первых тактах значительно больше, чем в последних. Поэтому время преобразования 16-разрядного АЦП последовательного приближения более, чем в два раза превышает время преобразования восьмиразрядного АЦП данного типа [5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

С учетом вышеизложенного была смоделирована схема АЦП параллельного типа (рис. 5). Схема АЦП содержит в себе 8 одинаковых резисторов и резистивный делитель, который делит опорное напряжение на 7 уровней. Выходные сигналы компараторов с помощью шифратора преобразуются в трехразрядный двоичный код и подаются на индикатор.

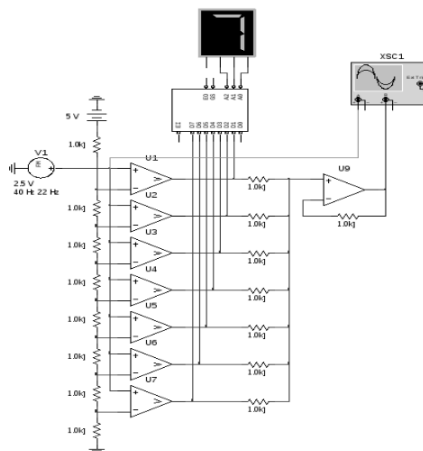


Рис. 5. Параллельный трехразрядный АЦП

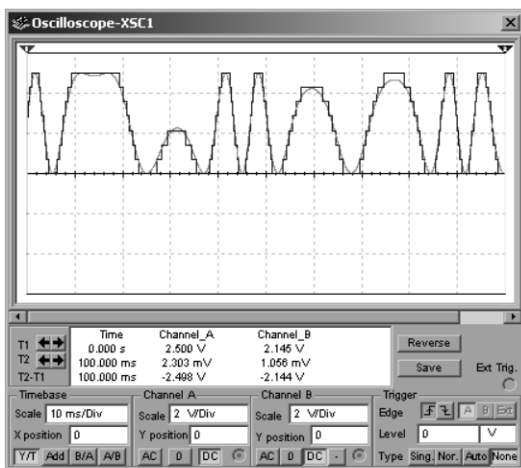


Рис. 6. Сигнал, снятый перед делителем (ломаная линия) и суммарный сигнал после прохождения компараторов (сплошная линия)

Данный тип АЦП отличается быстродействием, но для этого требуется большое число компараторов. Рассмотрим АЦП последовательного типа (рис. 7).

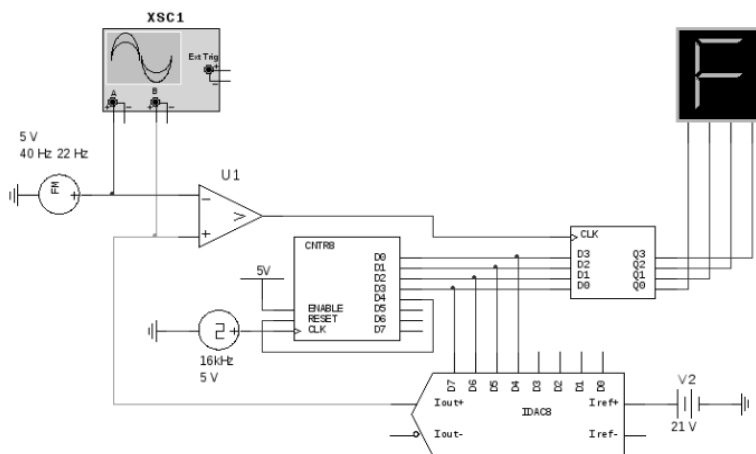


Рис. 7. Последовательный четырехбитный АЦП

На один из входов компаратора подается входное напряжение, на другой – выходное напряжение ЦАП. В самом начале работы счетчик принимает нулевое состояние, при этом выходное напряжение ЦАП равно нулю, а выходное напряжение компаратора принимает состояние «1». В момент подачи импульса на вход *CLK* счетчик начинает считывать импульсы, приходящие с генератора тактовых импульсов. Выходное напряжение ЦАП при этом линейно возрастает, пока не достигнет значения входного. При этом компаратор переходит в состояние логического нуля и счет импульсов останавливается. Установившееся число на выходе счетчика является пропорциональным напряжению на входе цифровым кодом. Далее процесс повторяется.

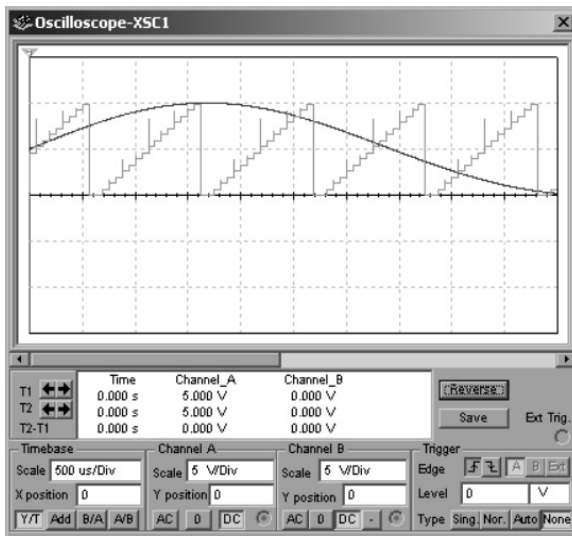


Рис. 8. Входное напряжение (сплошная линия) и линейно возрастающее напряжение на выходе ЦАП (ломаная линия)

Последовательные АЦП имеют низкое быстродействие. Из достоинств можно отметить сравнительную простоту реализации устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описаны основные методы построения АЦП и проведен их сравнительный анализ. В ходе сравнения было выявлено, что АЦП параллельного типа лучше подходят для использования в современной аппа-

ратуре, нежели последовательные, в силу своего быстрогодействия. К преимуществам последовательных АЦП можно отнести достаточно простую реализацию в интегральном исполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.
2. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. В 2 т. Т. 1. – М.: Додэка, 2008. – 827 с.
3. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. В 2 т. Т. 2. – М.: Додэка, 2008. – 941 с.
4. *Справочник по нелинейным схемам: Проектирование устройств на базе аналоговых функциональных модулей и интегральных схем: справочник / под ред. Д.Х. Шейнголда.* – М.: Мир, 1977. – 529 с.
5. *Борисенко А.Л.* Схемотехника аналоговых электронных устройств. Функциональные узлы: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2019. – 126 с.
6. *Якубовский С.В.* Аналоговые и цифровые интегральные схемы: справочник. – М.: Советское радио, 2008. – 336 с.
7. *Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: справочник / И.В. Новаченко, В.М. Петухов, И.П. Блудов, А.В. Юровский.* – М.: Радио и связь, 1989. – 383 с.
8. *Волович Г.И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 530 с.
9. *Павлов В.Н.* Схемотехника аналоговых электронных устройств. – М.: Академия, 2008. – 288 с.

Ульяшин Александр Федорович, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет 3 научные публикации. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

Величко Александр Андреевич, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет более 50 научных публикаций. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49

Comparative analysis of methods for constructing analog-to-digital converters*

A.F. Ulyashin¹, A.A. Velichko²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student of the department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Professor of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

This paper is devoted to the comparative analysis of modern integrated analog-to-digital converters (ADCs). At the moment, a number of foreign companies, such as Analog Devices, Texas Instruments and Microchip, produce ADCs in integrated design. Each manufacturer uses its own method of implementing the device. The main task of such devices is to convert voltage to binary code. ADCs are used wherever it is necessary to receive an analog signal and process it in digital form. Examples include applications such as communications and telecommunications, various radio systems, and measurement technology. Very important characteristics of such equipment are dynamic range, ease of implementation and speed. The means of analog-to-digital conversion are constantly being improved, which leads to an increase in the speed of the converters and the frequency band of the converted signals, an increase in the dynamic range, sensitivity and accuracy of the ADC. Significant interest in high-speed ADCs with a large dynamic range is explained by the fact that in the vast majority of telecommunications and radio engineering systems, direct signal conversion schemes without intermediate frequency conversion are increasingly used. Broadband applications have also been developed. The main requirement in these applications is the high sensitivity and wide dynamic range of the transducer for simultaneous detection of strong and weak signals. In this paper, a comparative analysis of the main types of analog-to-digital converters offered on the market is carried out in order to identify the most optimal construction method for using it in modern equipment.

Keywords: analog-to-digital converter, speed, dynamic range, sensitivity, broadband, analog signal, digital signal, telecommunication systems

REFERENCES

1. Horowitz P., Hill U. *The art of electronics*. 2nd ed. New York, Cambridge University Press, 1998 (Russ. ed.: Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki*. 2nd ed. Moscow, BINOM Publ., 2014. 704 p.).
2. Titts U., Schenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. V 2 t. T. 1 [Semiconductor circuitry. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Dodeka Publ., 2008. 827 p. (In Russian).

* Received 07 October 2020.

3. Tittse U., Schenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. V 2 t. T. 2 [Semiconductor circuitry. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Dodeka Publ., 2008. 941 p. (In Russian).
4. Sheingold D.H., ed. *Nonlinear circuits handbook: designing with analog function modules and IC's*. Norwood, MA, Analog Devices, inc., 1976 (Russ. ed.: *Proektirovanie ustroystv na baze analogovykh funktsional'nykh modulei i integral'nykh skhem: spravochnik*. Ed. by D.Kh. Sheingold. Moscow, Mir Publ., 1977. 529 p.).
5. Borisenko A.L. *Skhemotekhnika analogovykh elektronnykh ustroystv. Funktsional'nye uzly* [Circuitry of analog electronic devices. Functional nodes: a textbook for universities]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 126 p.
6. Yakubovskii S.V. *Analogoye i tsifrovye integral'nye skhemy* [Analog and digital integrated circuits]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 2008. 336 p.
7. Novachenko I.V., Petukhov V.M., Bludov I.P., Yurovskii A.V. *Mikroskhemy dlya bytovoi radioapparatury* [Microchips for household radio equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 383 p.
8. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* [Circuitry of analog and analog-digital electronic devices]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2005. 530 p.
9. Pavlov V.N. *Skhemotekhnika analogovykh elektronnykh ustroystv* [Circuitry of analog electronic devices]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 288 p.

Для цитирования:

Уляшин А.Ф., Величко А.А. Сравнительный анализ методов построения аналого-цифровых преобразователей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 4 (99). – С. 38–49. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49.

For citation:

Ulyashin A.F., Velichko A.A. Sravnitel'nyi analiz metodov postroeniya analogo-tsifrovyykh preobrazovatelei [Comparative analysis of methods for constructing analog-to-digital]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (99), pp. 38–49. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РОБАСТНЫХ ФУНКЦИЙ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ*

М.А. СИВАК

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры теоретической и прикладной информатики. E-mail: pepelyaeva@ami.nstu.ru

Статья посвящена анализу возможности применения робастных функций в нейронных сетях. В работе рассматриваются различные робастные (устойчивые) функции с точки зрения их использования в качестве функции потерь в робастной модификации алгоритма обратного распространения ошибки. Данный алгоритм накладывает условие, что функция потерь должна быть непрерывно или бесконечно дифференцируема. Выполнен анализ 12 различных функций и их производных. Производная функции Charbonnier была получена автором. Сделаны выводы о том, какие из выбранных функций целесообразно использовать при проведении дальнейших исследований.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, алгоритм обратного распространения ошибки, выбросы, робастный подход, функция потерь

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой мощный инструмент при решении задач анализа данных, однако зачастую точность их работы не слишком высокая [1–3]. Это связано в первую очередь с тем, что обычно анализируемые данные содержат в себе нетипичные наблюдения (или выбросы). Алгоритм обратного распространения ошибки, применяющийся для обучения ИНС, является неустойчивым к выбросам из-за использования в нем квадратичной функции потерь. Можно снизить влияние выбросов при обучении нейронной сети, если модифицировать данный алгоритм, используя робастный подход [4], который применяется как раз при работе с зашумленными данными. В рамках настоящей работы предполагается провести анализ нескольких робастных функций и определить, какие из них целесообразно использовать для построения устойчивого алгоритма обучения ИНС.

* Статья получена 13 октября 2020 г.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется нейронная сеть, состоящая из N слоев и имеющая m выходов. Тогда y_j , $j = 1, \dots, m$, – полученные значения на выходном слое нейронной сети; $w_{ik}^{(n-1)}$, $i = 1, \dots, l^{(n-1)}$, $k = 1, \dots, l^{(n)}$, – вес между k -м нейроном слоя n и i -м нейроном слоя $n-1$ ($l^{(n)}$ – количество нейронов на слое n).

При обучении нейронной сети требуется решить задачу оптимизации вида

$$E = \sum_{j=1}^{l^{(N)}} f(t_j, y_j) \rightarrow \min_{w_{ik}^{(1)}, \dots, w_{ik}^{(N-1)}}$$

где t_j – требуемый ответ на j -м выходе сети, а $f(t_j, y_j)$ – функция потерь на j -м выходе сети. Решение данной задачи требует вычисления производной суммарной функции потерь E , а следовательно, и производных отдельных функций $f(t_j, y_j)$ [5].

Как правило, в качестве функции потерь используют квадратичную функцию

$$f(t_j, y_j) = \frac{1}{2}(y_j - t_j)^2.$$

Однако, как уже было сказано выше, из-за использования данной функции алгоритм обучения нейронной сети является неустойчивым к выбросам. Вследствие этого была поставлена следующая задача: получить робастную модификацию алгоритма обратного распространения ошибки путем замены квадратичной функции потерь на устойчивую.

2. АНАЛИЗ РОБАСТНЫХ ФУНКЦИЙ

Прежде чем получить робастную модификацию алгоритма обратного распространения ошибки, необходимо выполнить анализ робастных функций и определить, какие из них можно и имеет смысл использовать. В ходе выполнения работы были проанализированы источники [6–14] и выбраны функции потерь, использующиеся в различных задачах анализа данных (например, для обработки изображений или оценивания параметров регрессий). При выборе функций учитывалось то, что функция потерь в алгоритме обратного распространения ошибки должна быть непрерывно или бесконечно дифференцируе-

мой. Так, например, функция Geman–Reynolds, представленная в [13], была исключена из рассмотрения по причине того, что ее первая производная не определена в нуле. Выбранные для анализа робастные функции приводятся в левом столбце таблицы, в правом столбце данной таблицы приводятся производные этих функций. Производная функции Charbonnier была получена автором, производные остальных функций были представлены в рассмотренных источниках.

Робастные функции потерь и их производные

Функция потерь	Производная функции потерь
1. Хьюбера	
$\begin{cases} \frac{1}{2}(y_j - t_j)^2, & y_j - t_j \leq \beta \\ \beta y_j - t_j - \frac{1}{2}\beta^2, & y_j - t_j > \beta \end{cases}$	$\begin{cases} y_j - t_j, & y_j - t_j \leq \beta \\ -\beta, & y_j - t_j < -\beta \\ \beta, & y_j - t_j > \beta \end{cases}$
2. Эндрюса	
$\begin{cases} \beta(1 - \cos \frac{(y_j - t_j)}{\beta}), & y_j - t_j < \pi\beta \\ 2\beta, & y_j - t_j \geq \pi\beta \end{cases}$	$\begin{cases} \sin \frac{(y_j - t_j)}{\beta}, & y_j - t_j < \pi\beta \\ 0, & y_j - t_j \geq \pi\beta \end{cases}$
3. Хампеля	
$\begin{cases} (y_j - t_j)^2, & 0 \leq y_j - t_j \leq \alpha \\ \alpha^2 + \alpha(y_j - t_j - \alpha), & \alpha < y_j - t_j \leq \beta \\ \alpha^2 + 2\alpha(\beta - \alpha) - \\ - \frac{\alpha(\gamma - y_j - t_j)^2}{\gamma - \beta} + \\ + \alpha(\gamma - \beta), & \beta < y_j - t_j \leq \gamma \\ \alpha^2 + 2\alpha(\beta - \alpha) + \alpha(\gamma - \beta), & \gamma < y_j - t_j \end{cases}$	$\begin{cases} 2(y_j - t_j), & 0 \leq y_j - t_j \\ \text{sign}(y_j - t_j)2\alpha, & \alpha < y_j - t_j \leq \beta \\ \frac{2\alpha}{\gamma - \beta}(\gamma - y_j - t_j)^* \\ * \text{sign}(y_j - t_j), & \beta < y_j - t_j \leq \gamma \\ 0, & \gamma < y_j - t_j \end{cases}$
4. Тьюки	
$\begin{cases} (y_j - t_j)^2, & y_j - t_j \leq \beta \\ \beta^2, & y_j - t_j > \beta \end{cases}$	$\begin{cases} 2(y_j - t_j), & y_j - t_j < \beta \\ 0, & y_j - t_j \geq \beta \end{cases}$

Окончание таблицы

5. Биквадратная Тьюки	
$\begin{cases} \frac{(y_j - t_j)^6}{6\beta^4} - \frac{(y_j - t_j)^4}{2\beta^2} + \frac{(y_j - t_j)^2}{2}, & y_j - t_j < \beta \\ \frac{\beta^2}{6}, & y_j - t_j \geq \beta \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{(y_j - t_j)^5}{\beta^4} - \frac{2(y_j - t_j)^3}{\beta^2} + (y_j - t_j), & y_j - t_j < \beta \\ 0, & y_j - t_j \geq \beta \end{cases}$
6. Рамсея	
$\frac{1 - (1 + \beta y_j - t_j)\exp(-\beta y_j - t_j)}{\beta^2}$	$(y_j - t_j)\exp\{-\beta y_j - t_j \}$
7. Коши (Лоренца)	
$\ln\left(\frac{1}{2}\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2 + 1\right)$	$\frac{y_j - t_j}{\frac{1}{2}(y_j - t_j)^2 + \beta^2}$
8. Geman–McCluer	
$\frac{(y_j - t_j)^2 / \beta}{1 + (y_j - t_j)^2 / \beta}$	$\frac{2(y_j - t_j)}{\beta(1 + (y_j - t_j)^2 / \beta)^2}$
9. «Fair»	
$\beta^2 \left(\frac{ y_j - t_j }{\beta} - \ln\left(1 + \frac{ y_j - t_j }{\beta}\right) \right)$	$\frac{y_j - t_j}{(1 + y_j - t_j / \beta)}$
10. Charbonnier	
$\sqrt{\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2 + 1}$	$\frac{1}{\beta^2} \frac{y_j - t_j}{\sqrt{(y_j - t_j)^2 / \beta^2 + 1}}$
11. Welsch	
$1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2\right)$	$\frac{1}{\beta^2}(y_j - t_j)\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2\right)$
12. Мешалкина	
$\beta^{-1} \left(1 - \exp\left(\frac{-\beta(y_j - t_j)^2}{2}\right) \right)$	$\exp\left(\frac{-\beta(y_j - t_j)^2}{2}\right)(y_j - t_j)$

Все рассмотренные функции можно разделить на две группы. В первую группу входят функции, параметры которых определяют не только поведение функций на интервалах области определения, но и граничные точки этих интервалов. Ко второй группе относятся функции, параметры которых определяют поведение данных функций на всей области определения.

Функции второй группы принадлежат классу бесконечно дифференцируемых функций. Производные этих функций стремятся к константе при модуле аргумента, стремящемся к бесконечности. Функции первой группы принадлежат к классу непрерывно-дифференцируемых функций. Их первая производная не является дифференцируемой во всех точках области определения и при модуле аргумента, стремящемся к бесконечности, равна константе. Такое поведение первых производных позволяет учитывать влияние выбросов при обучении нейронной сети пропорционально их удаленности от основной группы наблюдений.

Среди функций первой группы особое внимание следует уделить функции Хампеля, поскольку в ней используется не один параметр, а три, что потенциально может обеспечить более гибкую настройку алгоритма. Также можно заметить, что производные функций Тьюки и Хьюбера являются схожими по виду с той лишь разницей, что на полуинтервалах $(-\infty, -\beta]$ и $[\beta, +\infty)$ производная функции Тьюки приобретает нулевое значение. Поскольку от значения параметра β зависит только ширина обозначенных интервалов, но не само значение производной, использование этой функции представляется сомнительным, так как выбросы в данном случае будут попросту исключаться (либо рассматриваемая функция будет совпадать с квадратичной функцией). В то же время функция Эндрюса и биквадратная функция Тьюки, хотя их производные и приобретают нулевое значение на тех же самых полуинтервалах, представляют собой гораздо больший интерес, так как значение параметра влияет не только на ширину интервалов, но и на значение самой производной.

Что касается функций второй группы, среди них можно отдельно выделить функцию Charbonnier, поскольку ее производная единственная при стремлении аргумента к $\pm\infty$ стремится не к нулевому значению, а к значению $\pm \frac{1}{\beta}$. Такое поведение производной за счет изменения значения параметра β , вероятно, может позволить дополнительно контролировать влияние выбросов при обучении нейронной сети.

Использование рассмотренных робастных функций (за исключением функции Тьюки по обозначенной выше причине) вместо квадратичной функции потерь позволит получить класс совершенно новых нейронных сетей,

свойства которых необходимо будет изучить в ходе дальнейших исследований. В работе [15] уже были получены первые результаты для модификации алгоритма обратного распространения ошибки с использованием функции Хьюбера, что показывает потенциальную возможность применения других робастных функций в нейронных сетях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе настоящей работы были выбраны и проанализированы 12 робастных функций. Все они удовлетворяют условиям алгоритма обратного распространения ошибки (имеют производную первого порядка). Выбранные функции были разделены на две группы в зависимости от того, что определяют их параметры: поведение функции на всей области определения или поведение функции на интервалах области определения, а также граничные точки данных интервалов. В ходе анализа был сделан вывод о том, что одну из функций (Тьюки) целесообразно будет исключить из дальнейшего рассмотрения, тогда как остальные 11 функций могут быть использованы при модификации алгоритма обучения ИНС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90077.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф., Лобова Т.И. Нейросетевой анализ сложноорганизованных экологических данных // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6754> (дата обращения: 12.03.2021).
2. Манжула В.Г., Федяшов Д.С. Нейронные сети Кохонена и нечеткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 4. – С. 108–115. – URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=21239> (дата обращения: 12.03.2021).
3. Perervenko V. Глубокие нейросети. Ч. 1. Подготовка данных. – URL: <https://www.mql5.com/ru/articles/3486> (дата обращения: 12.03.2021).
4. Huber J.P. Robust statistics. – 2nd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2009. – 370 p. – DOI: 10.1002/9780470434697.
5. Bishop C. Neural networks for pattern recognition. – New York: Oxford University Press, 1995. – 502 p.

6. *Fan J., Gijbels I.* Local polynomial modelling and its applications. – London: Chapman & Hall, 1996. – 360 p. – DOI: 10.1201/9780203748725.
7. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 448 с.
8. *Вучков И., Бояджијева Л., Солаков Е.* Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 240 с.
9. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 304 с.
10. *Дрейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
11. *Black M.J., Anandan P.* The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fields // *Computer Vision and Image Understanding*. – 1996. – Vol. 63, N 1. – P. 75–104.
12. Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging / P. Charbonnier, L. Blanc-Feraud, G. Aubert, M. Barlaud // *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Image Processing*. – Austin, TX, 1994. – Vol. 2. – P. 168–172.
13. *Black M.J., Rangarajan A.* On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision // *International Journal of Computer Vision*. – 1996. – Vol. 19 (1). – P. 57–91. – DOI: 10.1007/BF00131148.
14. *Vanerjee R.* Fair M-Estimators as a cost function for FASTICA // *International Conference on Signal Processing and Communication, ICSC 2013*. – Noida, India, 2013. – P. 445–448. – DOI: 10.1109/ICSPCom.2013.6719831.
15. *Сивак М.А., Тимофеев В.С.* Оптимизация работы робастной нейронной сети для задачи классификации // *Наука. Технологии. Инновации: в 9 ч.*, Новосибирск, 30 ноября – 4 декабря 2020. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 298–300.

Сивак Мария Алексеевна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории планирования эксперимента и анализа многофакторных объектов им. Денисова В.И. Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – прикладная математическая статистика, машинное обучение, обработка текстов на естественном языке. E-mail: pepelyaeva@ami.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-50-58

The research on using robust functions for neural networks*

M.A. Sivak

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student of the department of theoretical and practical computer science. E-mail: pepelyaeva@ami.nstu.ru

The paper is devoted to analyzing the ability of using robust functions for building neural networks. The research highlights different robust functions in terms of applying them for obtaining a robust modification of the back-propagation algorithm. The algorithm requires that the used loss function should be infinitely or continuously differentiable. The analysis of twelve different functions has been done. The derivative of Charbonnier function has been obtained by the author. The results of analysis shows which functions can be used for the further investigation and which ones should be excluded from it.

Keywords: artificial neural network, back-propagation algorithm, outliers, robust approach, loss function

REFERENCES

1. Lankin Yu.P., Baskanova T.F., Lobova T.I. Neurosetevoi analiz slozhnoorganizovannykh ekologicheskikh dannykh [Neural network analysis of complicated ecological data]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2012, no. 4. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6754> (accessed 12.03.2021).
2. Manzhula V.G., Fedyashov D.S. Neironnye seti Kokhonena i nechetkie neironnye seti v intellektual'nom analize dannykh [Kohonen neural networks and fuzzy neural networks in data mining]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2011, no. 4. pp. 108–115. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=21239> (accessed 12.03.2021).
3. Perervenko V. *Glubokie neuroseti*. Ch. 1. *Podgotovka dannykh* [Deep neural networks. Pt. 1. Data preprocessing]. Available at: <https://www.mql5.com/ru/articles/3486> (accessed 12.03.2021).
4. Huber J.P. *Robust statistics*. 2nd ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2009. 370 p. DOI: 10.1002/9780470434697.
5. Bishop C. *Neural networks for pattern recognition*. New York, Oxford University Press, 1995. 502 p.
6. Fan J., Gijbels I. *Local polynomial modelling and its applications*. London, Chapman & Hall, 1996. 360 p. DOI: 10.1201/9780203748725.

* Received 13 October 2020.

7. Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: issledovanie zavisimostei* [Applied statistics: dependency investigation]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1985. 448 p.
8. Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov E. *Prikladnoi lineinyi regressionnyi analiz* [Applied linear regression analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1987. 240 p.
9. Demidenko E.Z. *Lineinaya i nelineinaya regressii* [Linear and non-linear regressions]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1981. 304 p.
10. Draper N.R., Smith H. *Applied regression analysis*. 3rd ed. New York, Wiley, 1998 (Russ. ed.: Dreiper N., Smit G. *Prikladnoi regressionnyi analiz*. 3rd ed. Moscow, Williams Publ., 2007. 912 p.).
11. Black M.J., Anandan P. The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fields. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996, vol. 63, no. 1, pp. 75–104.
12. Charbonnier P., Blanc-Feraud L. Aubert G., Barlaud M. Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging. *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, TX, 1994, vol. 2, pp. 168–172.
13. Black M.J., Rangarajan A. On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision. *International Journal of Computer Vision*, 1996, vol. 19 (1), pp. 57–91. DOI: 10.1007/BF00131148.
14. Banerjee R. Fair M-Estimators as a cost function for FASTICA. *International Conference on Signal Processing and Communication, ICSC 2013*, Noida, India, 2013, pp. 445–448. DOI: 10.1109/ICSPCom.2013.6719831.
15. Sivak M.A., Timofeev V.S. [Optimizing robust neural network for the classification problem]. *Nauka. Tehnologii. Innovatsii*. V 9 ch. [Science. Technology. Innovation. In 9 pt.], Novosibirsk, 2020, pt. 2, pp. 298–300. (In Russian).

Для цитирования:

Сивак М.А. Исследование применимости робастных функций потерь в нейронных сетях // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 4 (99). – С. 50–58. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-50-58.

For citation:

Sivak M.A. Issledovanie primenimosti robastnykh funktsii poter' v neuronnykh setyakh [The research on using robust loss functions for neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (99), pp. 50–58. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-50-58.

СОВРЕМЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.4'242

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-59-70

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ
АЛГОРИТМОВ***

Е.Л. РОМАНОВ¹, Т.А. РОМАНЕНКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: romanov@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры вычислительной техники. E-mail: romanenko@corp.nstu.ru

Тема статьи относится к внедрению в систему дистанционного образования НГТУ таких форм обучения, как визуализаторы алгоритмов.

Ключевые слова: алгоритм, визуализатор, тренажер, автоматное программирование, автомат Мили, автомат Мура, автомат состояний

ВВЕДЕНИЕ

Для студентов факультета АВТФ и Института дистанционного образования НГТУ в рамках системы дистанционного обучения Dispace и ИДО НГТУ используется электронное учебное пособие «Структуры и алгоритмы обработки данных» [1].

Для пособия разработаны визуализаторы динамики работы наиболее сложных по логике и структуре фундаментальных алгоритмов:

– визуализаторы алгоритмов сортировки (пирамидальной сортировки, сортировки с помощью дерева выбора, сортировки разделением, сортировки слиянием, поразрядной сортировки);

– визуализаторы для сбалансированных деревьев поиска (рандомизированного дерева, AVL-дерева, красно-черного дерева, 2-3-дерева), внешнего B-дерева поиска;

* Статья получена 04 ноября 2020 г.

- визуализатор алгоритма формирования оптимального бинарного дерева поиска;
- визуализатор алгоритмов для хэш-таблиц с открытой адресацией;
- визуализаторы для алгоритмов на графах (обобщенного поиска на графе, алгоритмов Дейкстры, Джонсона, Флойда для построения кратчайших путей).

1. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

По ходу разработки и апробации этой серии визуализаторов формировались требования к функциональности, общие подходы к проектированию программных визуализаторов.

Представленные визуализаторы делятся на две группы – демонстрационные и тренажеры.

Демонстрационные визуализаторы предназначены для наблюдения на экране монитора анимированных действий алгоритма. Вмешательство наблюдателя минимально и сводится в основном к заданию алгоритму исходных данных. Возможны два режима анимации – автоматический под управлением программы визуализатора и пошаговый под управлением наблюдателя. Возможен вывод подстрочных комментариев о действиях алгоритма по ходу анимации его действий. Также используется отдельная справочная подсистема визуализатора с описанием алгоритма.

Визуализаторы-тренажеры в дополнение к демонстрации работы алгоритма предоставляют наблюдателю управление шагами алгоритма с помощью панели инструментов, оценивают ходы наблюдателя, сообщают об ошибочных ходах, позволяют выполнять откат назад путем отмены последних ошибочных действий.

Последние по хронологии разработки универсальные визуализаторы совмещают в своей функциональности оба режима – демонстрации и тренажера.

На рис. 1 показана типовая функциональность визуализаторов, предоставляемая для изучения алгоритмов.

Для реализации визуализаторов используется технология Java Applets, которая предоставляет максимальные преимущества для реализации приложений в Интернете [2]. Программы визуализаторов в виде отдельных модулей java-апплетов включаются в раздел визуализаторов электронного учебного пособия «Структуры и алгоритмы обработки данных» [1].

Традиционно при проектировании и программировании выделяются несколько событийно-управляемых подсистем визуализатора:

- подсистема взаимодействия с пользователем;
- подсистема отображения данных;

- подсистема демонстрации работы алгоритма;
- подсистема тренажера.



Рис. 1. Функциональная диаграмма визуализатора

Подсистемы со своими специфическими функциями проектируются в виде совокупности классов. Объекты подсистем и сами подсистемы взаимодействуют через механизм обработки событий (выбор команды или инструмента пользователем, выделение мышью фрагментов изображения на экране, таймер и т. п.).

Для сложных алгоритмов с запутанным ходом выполнения применение событийно-ориентированного программирования является обычным. Проектирование обработки событий, последовательности и взаимосвязи событий зачастую носит эвристический характер, приводит к громоздкой схеме взаимодействий обработчиков событий, к проверке многочисленных флагов для восстановления предыстории событий.

В этом случае целесообразно применить другую парадигму программирования – автоматное программирование [3]. Авторы статьи «Использование автоматного подхода для реализации вычислительных алгоритмов» [4] предложили использовать особенности автоматных программ для построения визуализаторов. В состав визуализатора вводится подсистема логики, управляющая с помощью автоматной модели передвижением по алгоритму и визуализацией данных и состояний алгоритма.

В качестве примера автоматного подхода к проектированию представлен фрагмент визуализатора для Б-дерева поиска – визуализация алгоритма вставки [6].

Визуализатор включает 4 модуля (рис. 2).

1. **Модуль интерфейса** – включает набор инструментов, через которые пользователь может формировать исходную структуру Б-дерева, выбирать для выполнения операцию, просматривать ее работу в режиме демонстрации, продвигаться по алгоритму по шагам.

2. **Автомат** – управляет пошаговым передвижением по алгоритму с помощью автоматной модели.

3. **Б-дерево** – реализует структуру Б-дерева и выполняет алгоритм вставки (шаги), задаваемые автоматом, или команду управления визуализатором.

4. **Отображение** – отвечает за отображение структуры Б-дерева и иллюстрацию шагов алгоритма.



Рис. 2. Структурная схема визуализатора

В основе автомата для пошагового выполнения лежит логика «интересных» состояний, в которых информация об алгоритме и данных отображается пользователю.

Разработка автоматной модели алгоритма сводится к следующим шагам.

1. По визуализируемому алгоритму пишется процедурная программа, его реализующая.

2. Используемые переменные выносятся в модель данных (структуру данных). Передача параметров процедурам и результатов процедур осуществляется через модель.

3. Программа преобразуется с целью использования в ней следующих операторов:

- оператора присваивания,
- последовательности операторов (составного оператора),
- укороченного оператора ветвления (if-then),
- полного оператора ветвления (if-then-else),
- цикла с предусловием (while),
- вызова процедуры.

4. Действия программы преобразуются в систему взаимосвязанных состояний конечного автомата.

Примером проектирования служит автомат для алгоритма вставки элемента в Б-дерево [5].

Б-дерево – сбалансированное дерево, удобное для хранения информации во внешней (дисковой) памяти. Характерным для Б-дерева является его малая высота. Представление информации во внешней памяти в виде Б-дерева стало стандартным способом в системах баз данных.

В Б-дереве узел может иметь много сыновей. Количество сыновей (максимальное) определяет степень Б-дерева. Узлы Б-дерева содержат не один элемент, а группу элементов с суммарным объемом в один блок файла, который обычно по размеру соответствует одному сектору диска. Типичная степень узла $t = 50 \dots 2000$ сыновей.

Например, Б-дерево степени 1000 и высоты 2 может хранить более миллиарда ключей.

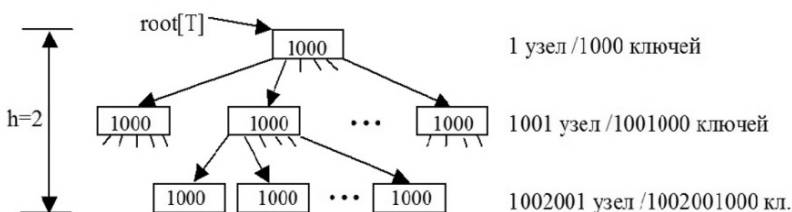


Рис. 3. Структура Б-дерева

Модель данных визуализатора представляет собой связную структуру узлов Б-дерева, в которой узлы дерева размещены в оперативной памяти и связаны между собой адресными указателями, степень узлов t – от двух до четырех сыновей. Отсутствуют данные, связанные с ключами, файловые указатели на блоки во внешней памяти. Отдельный узел x в модели Б-дерева включает следующие переменные:

$leaf[x] = TRUE$, если x – лист дерева, $FALSE$ – иначе;

$n[x]$ – количество ключей, хранящихся в x ;

$key_1[x], key_2[x], \dots, key_n[x]$ – массив ключей, хранящихся в x ;

$c_1[x], c_2[x], \dots, c_{n+1}[x]$ – массив указателей на дочерние узлы.

Программа вставки в Б-дерево, включающая три процедуры, размещена в модуле «Алгоритмы Б-дерева». Она составлена в соответствии со следующим псевдокодом алгоритма [5]:

Алгоритм вставки в Б-дерево

B_Tree_Insert (T, k) ▷ T – структура модели Б-дерева, k – ключ нового элемента

1. $r \leftarrow \text{root}[T]$
2. **if** $n[r] = 2t - 1$
3. **then** $s \leftarrow \text{Allocate_Node}()$ ▷ создание нового корня s
4. $\text{root}[T] \leftarrow s$
5. $\text{leaf}[s] \leftarrow \text{FALSE}$
6. $n[s] \leftarrow 0$
7. $c_i[s] \leftarrow r$
8. **B_Tree_Split** (s, 1, r) ▷ расщепление старого корня r
9. **B_Tree_Insert_Nonfull** (s, k) ▷ вставка в неполный узел
10. **else** **B_Tree_Insert_Nonfull** (r, k)

Алгоритм расщепления полного узла

B_Tree_Split_Child (x, i, y)

1. $z \leftarrow \text{Allocate_Node}()$ ▷ создание нового дочернего узла z
2. $\text{leaf}[z] \leftarrow \text{leaf}[y]$
3. $n[z] \leftarrow t - 1$
4. **for** $j \leftarrow 1$ **to** $t - 1$ ▷ копирование ключей из y в z
5. **do** $\text{key}_j[z] \leftarrow \text{key}_{t+j}[y]$
6. **if not** $\text{leaf}[y]$
7. **then for** $j \leftarrow 1$ **to** t ▷ копирование сыновей из y в z
8. **do** $c_j[z] \leftarrow c_{t+j}[y]$
9. $n[y] \leftarrow t - 1$
10. **for** $j \leftarrow n[x] + 1$ **downto** $i + 1$
11. **do** $c_{j+1}[x] \leftarrow c_j[x]$ ▷ смещение сыновей в узле x
12. $c_{j+1}[x] \leftarrow z$
13. **for** $j \leftarrow n[x]$ **downto** i
14. **do** $\text{key}_{j+1}[x] \leftarrow \text{key}_j[x]$ ▷ смещение ключей в узле x
15. $\text{key}_i[x] \leftarrow \text{key}_t[y]$
16. $n[x] \leftarrow n[x] + 1$

Алгоритм вставки в неполный узел**B_Tree_Insert_Nonfull (x, k)**

```

1.  $i \leftarrow n[x]$ 
2. if leaf[x] = TRUE
3.   then while  $i \geq 1$  и  $k < key_i[x]$ 
4.     do  $key_{i+1}[x] \leftarrow key_i[x]$ 
5.        $i \leftarrow i-1$ 
6.      $key_{i+1}[x] \leftarrow k$ 
7.      $n[x] \leftarrow n[x]+1$ 
8.   else while  $i \geq 1$  и  $k < key_i[x]$ 
9.     do  $i \leftarrow i-1$ 
10.     $i \leftarrow i+1$ 
11.    if  $n[c_i[x]] = 2t-1$ 
12.      then B_Tree_Split(x, i,  $c_i[x]$ )
13.      if  $k > key_i[x]$ 
14.        then  $i \leftarrow i+1$ 
15.      B_Tree_Insert_Nonfull( $c_i[x]$ , k)

```

По псевдокоду алгоритма разработан смешанный конечный автомат Мили–Мура, в котором действия выполняются как в вершинах, так и на переходах. В соответствии с методом, изложенным в [3], для пошаговой визуализации алгоритма вставки определено 8 состояний (рис. 4).

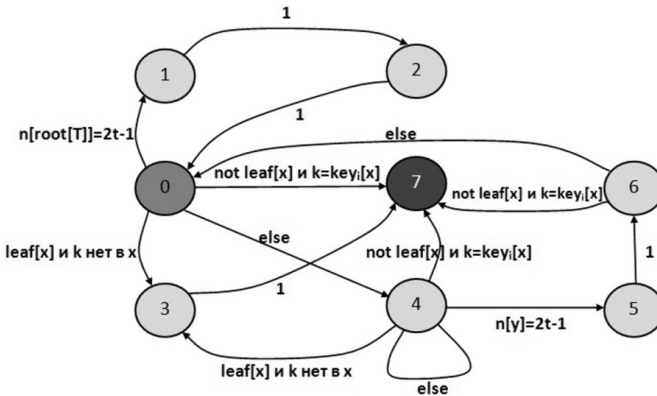


Рис. 4. Граф переходов конечного автомата

Вершины соответствуют «интересным» состояниям алгоритма, которые подлежат отображению на экране. На дугах заданы условия переходов между

вершинами согласно алгоритму. Безусловные переходы на дугах обозначены значением «1». В таблице приведен фрагмент описаний действий на переходах конечного автомата.

Описание действий на переходах автомата алгоритма вставки в Б-дереве

Номер состояния или перехода	Действия на переходе
0	Начальное состояние автомата (выделение корня красным цветом и выполнение начала алгоритма вставки (B_Tree_Insert))
7	Конечное состояние автомата
$0 \rightarrow 1$	if $n[\text{root}] = 2t - 1$, то мигание заполненного корня
$0 \rightarrow 7$	Поиск позиции i , в которой $\text{key}_i[x] < k$. Если ключ k существует в узле x , то переход в конечное состояние 7. (B_Tree_Insert_Nonfull)
$0 \rightarrow 3$	Поиск позиции i , в которой $\text{key}_i[x] < k$. if leaf[x] = TRUE (лист) и добавляемого ключа k нет в узле x , то добавление ключа k в позицию i узла и его выделение желтым цветом
$0 \rightarrow 4$	Поиск позиции i , в которой $\text{key}_i[x] < k$. Если ключ k отсутствует во внутреннем узле x , то инкремент i , выделение дочернего узла $y = c_i[x]$ и связи между узлами x и y красным цветом
$4 \rightarrow 5$	if $n[y] = 2t - 1$, то мигание узла y
$1 \rightarrow 2$	Расщепление корня дерева и выделение образовавшихся новых узлов y и z зеленым цветом (B_Tree_Split_Child)

Результат визуализации перехода $0 \rightarrow 1$ под управлением автомата приведен на рис. 5.

Автоматное программирование успешно применено к визуализации таких сложных алгоритмов, как алгоритм удаления из Б-дерева [5], алгоритм построения оптимального дерева поиска [7].

Для алгоритма построения оптимального дерева поиска были разработаны два автомата для прямой и обратной логики алгоритма. Благодаря автомату обратной логики [8] стало возможным продвигаться по шагам алгоритма вперед и возвращаться к ранее пройденным шагам. Обратный ход по алгоритму особенно полезен в режиме тренажера при поиске ошибки, допущенной в пройденных шагах. Но разработка обратной логики для алгоритма построения оптимального дерева поиска оказалась сложной задачей. Более простой способ – на каждом шаге автомата прямой логики помещать модель данных (все переменные, с которыми оперирует алгоритм) в стек, а при обратном ходе просто восстанавливать состояние модели к нужному состоянию автомата.

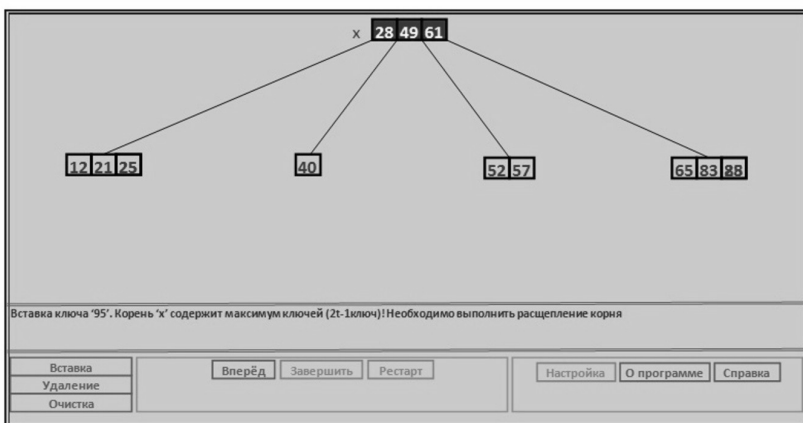


Рис. 5. Переход 0 → 1. Случай заполненного корня

Также в визуализаторы введены такие элементы обучения, как отображение модели данных алгоритма, подстрочные комментарии к каждому шагу алгоритма, синхронная демонстрация команд работающего алгоритма по его псевдокоду, раздел справки с общим описанием алгоритма (рис. 6).

Рис. 6. Окно визуализатора построения оптимального дерева поиска

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода автоматного программирования для проектирования визуализаторов алгоритмов позволило:

- определить логику пошаговой работы с помощью конечного автомата состояний алгоритма;
- упростить проектирование и программирование визуализаторов за счет лучшей структурированности программ;
- существенно упростить отладку и рефакторинг программ.

Основываясь на опыте разработки представленных в статье визуализаторов, можно рекомендовать применение автоматного программирования как методику проектирования обучающих программ для алгоритмов со сложным поведением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структуры и алгоритмы обработки данных: электронное учебное пособие / Т.А. Романенко. – URL: <http://edu.nstu.ru/courses/saod/index.htm> (дата обращения: 15.03.2021).
2. *Поликарпова Н.И., Шалыто А.А.* Автоматное программирование. – СПб.: б. и., 2008. – 168 с.
3. *Казаков М.А., Шалыто А.А., Туккель Н.И.* Использование автоматного подхода для реализации вычислительных алгоритмов // Телематика-2001: труды Международной научно-методической конференции. – СПб., 2001. – С. 174–176.
4. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р.* Алгоритмы. Построение и анализ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1926 с.
5. *Казаков М.А., Шалыто А.А.* Использование автоматного подхода для реализации визуализаторов // Компьютерные инструменты в образовании. – 2004. – № 2. – С. 19–33.
6. *Вирт Н.* Алгоритмы и структуры данных: пер. с англ. – 2-е изд., испр. – СПб.: Невский диалект, 2005. – 352 с.
7. *Казаков М.А., Столяр С.Е.* Визуализаторы алгоритмов как элемент технологии преподавания дискретной математики и программирования // Телематика-2000: тезисы докладов Международной научно-методической конференции. – СПб., 2000. – С. 189–191.

Романов Евгений Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – клиент-серверные приложения. Имеет более 50 публикаций. E-mail: romanov@corp.nstu.ru

Романенко Татьяна Александровна, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – технология программирования. Имеет более 22 публикаций. E-mail: romanenko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-59-70

Algorithm visualizers design technology*

E.L. Romanov¹, T.A. Romanenko²

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, docent of the computing engineering department. E-mail: romanov@corp.nstu.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer of the faculty of automation and computing engineering. E-mail: romanenko@corp.nstu.ru

The topic of the article relates to the introduction of such forms of education as visualizers of algorithms into the distance education system of NSTU.

Keywords: algorithm, visualizer, simulator, automatic programming, Miles automaton, Moore automaton, state automaton

REFERENCES

1. Romanenko T.A. *Struktury i algoritmy obrabotki dannykh* [Training manual "Data processing structures and algorithms"]. Available at: <http://edu.nstu.ru/courses/saod/index.htm> (accessed 15.03.2021).
2. Polikarpova N.I., Shalyto A.A. *Avtomatnoe programmirovaniye* [Automatic programming]. St. Petersburg, 2008. 168 p.
3. Kazakov M.A., Shalyto A.A., Tukul' N.I. [Using of state machine approach in flow algorithms implementation]. *Telematika-2001: trudy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Proceedings of the international scientific and

* Received 04 November 2020.

methodological conference "Telematics-2001"]. St. Petersburg, 2001, pp. 174–176. (In Russian).

4. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L. *Introduction to algorithms*. 2nd ed. Cambridge, MA, MIT Press, 2001 (Russ. ed.: Kormen T., Leiserson Ch., Rivest R. *Algoritmy. Postroenie i analiz*. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2005. 1290 p.).

5. Kazakov M.A., Shalyto A.A. Ispol'zovanie avtomatnogo podkhoda dlya realizatsii vizualizatorov [Using an automatic approach to implement visualizers]. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii = Computer Tools in Education*, 2004, no. 2, pp. 19–33.

6. Wirth N. *Algorithms and data structures*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986 (Russ. ed.: Virth N. *Algoritmy i struktury dannykh*. 2nd ed. St. Petersburg, Nevskii dialect Publ., 2005. 352 p.).

7. Kazakov M.A., Stolyar S.E. [Visualizers of algorithms as an element of the technology of teaching discrete mathematics and programming]. *Telematika-2000: tezis dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Abstracts of reports of the International scientific and methodological conference "Telematics-2000". St. Petersburg, 2000, pp. 189–191. (In Russian).

Для цитирования:

Романов Е.Л., Романенко Т.А. Технология проектирования визуализаторов алгоритмов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020 – № 4 (99). – С. 59–70. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-59-70.

For citation:

Romanov E.L., Romanenko T.A. Tehnologiya proektirovaniya vizualizatorov algoritmov [Algorithm visualizers design technology]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (99), pp. 59–70. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-59-70.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

УСЛОВИЯ ПРИЕМА СТАТЕЙ

В редакцию **Сборника научных трудов НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья объемом 8–12 страниц от магистрантов, аспирантов в соавторстве со специалистами, имеющими ученую степень, и 16–22 страницы от докторантов, печатная версия – два экземпляра, подписанных авторами (требования к оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>).

2. Контактная информация (телефоны, адреса электронной почты, место работы, должность, ученая степень, ученое звание автора) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)» – печатная версия, один экземпляр (<http://sbornik.infoterra.ru>).

4. Электронная версия статьи, контактной информации, описание статьи для базы данных РИНЦ, реферат на англ. языке – в отдельных файлах на CD.

5. Рецензия объемом одна-две страницы в двух экземплярах.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования – один экземпляр.

Внимание! Все математические формулы в статьях должны быть набраны в MathType.

Информацию о сборнике, дополнительную информацию, документацию по оформлению см. на сайте: <http://sbornik.infoterra.ru>
journals.nstu.ru/sbornik

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РАЗДЕЛЫ СБОРНИКА

Автоматическое управление (и идентификация)

Моделирование процессов и устройств

Обработка информации

Современные информационные технологии

Электроэнергетика, электромеханика и электротехнологии

Механика (гидрогазодинамика)

Физика и математика

Материаловедение

Сообщения и дискуссии

Педагогика

Авторы, не являющиеся сотрудниками НГТУ, представляют сопроводительное письмо на имя проректора по научной работе НГТУ.

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов.

Плата за публикацию рукописей не взимается.