

**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**

**В.И. Денисов**, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, 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](mailto: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 (90)

2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

- Воевода А.А., Бобобеков К.М.** О необходимом условии существования решения при полиномиальном методе синтеза одноканальных систем..... 7

*МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ*

- Захаров И.А., Устюгова И.Н., Попова Т.С.** Разработка искусственного сустава для применения в робототехнике..... 21
- Филиппов Б.И., Кожаева А.О.** Разработка структурной схемы аппаратуры измерения дистанции в гидроакустическом канале..... 33

*СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ*

- Иванов Н.О., Тингайкин Д.О., Комиссаров В.В.** Пример сложения чисел в бинарном представлении с использованием нейронной сети..... 49
- Черданцев К.А., Кладько А.В.** Анализ звукового спектра голосовых команд с помощью нейронной сети..... 65

*ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ*

- Филиппов Б.И., Рудковский А.А.** Проектирование ретрансляционной линии гидроакустического канала связи..... 77

<b>Филиппов Б.И., Спирынин В.А.</b> Описание и обоснование структурной схемы аппаратуры гидроакустического канала связи .....	97
--	----

*СООБЩЕНИЯ*

<b>Донской К.А., Левин Л.С., Попантонопуло Е.В.</b> Информационная безопасность Интернета вещей .....	128
--	-----

Правила для авторов .....	144
---------------------------	-----

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

---

Лицензия № ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 02.03.2018  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 8,37  
Печ. л. 9,0. Изд. № 38. Заказ № 418. 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***

***Denisov V.I.***, 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](mailto:ucit@ucit.ru)

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

© Authors, 2017

© Novosibirsk State

Technical University, 2017

**CONTENTS**

*AUTOMATIC CONTROL AND IDENTIFICATION*

- Voevoda A.A., Bobobekov K.M.** About the necessary conditions of existence of the solution in polynomial method of synthesis of single-channel systems ..... 7

*MODELLING OF PROCESSES AND DIVICES*

- Zakharov I.A., Ustyugova I.N., Popova T.S.** The development of a joint, is most effective for use in robotics..... 21
- Filippov B.I., Kozhaeva A.O.** Development of the structural scheme of the remote measurement equipment in the hydroacoustic channel..... 33

*MODERN INFORMATIONAL TECHNOLOGIES*

- Ivanov N.O., Tingajkin D.O., Komissarov V.V.** Example of adding numbers in a binary representation using neural networks..... 49
- Cherdantsev K.A., Kladko A.V.** Analysis of the sound spectrum of voice commands with the neuron network ..... 65

*INFORMATION PROCESSING*

- Filippov B.I., Rudkovskiy A.A.** Design of the relaying line of a hydroacoustic communication channel..... 77

<b>Filippov B.I., Spiryanin V.A.</b> Design and Description of hardware structure of hydroacoustic communication channel .....	97
--	----

*SHORT PAPERS*

<b>Donskoy K.A., Levin L.S., Popontonopulo E.V.</b> Information security of internet things .....	128
---	-----

Rules for authors .....	144
-------------------------	-----

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

---

License № ID 04303 from 20.03.01. Signed in print 02.03.2018. Format 60 × 84/16  
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 8,37. printed pages 9,0.  
Publishing number 38. Order number 418.

---

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

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 681.513

**О НЕОБХОДИМОМ УСЛОВИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ  
РЕШЕНИЯ ПРИ ПОЛИНОМИАЛЬНОМ МЕТОДЕ  
СИНТЕЗА ОДНОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ\***

А.А. ВОЕВОДА<sup>1</sup>, К.М. БОБОБЕКОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon\_111@mail.ru

Решается задача полиномиального метода синтеза одноканальных систем в случае, когда полиномы числителя и знаменателя объекта не взаимно простые. Обычно учитывают ограничение, накладываемое на математическое описание объекта, при полиномиальном синтезе многоканальных регуляторов, состоящее в требовании взаимной простоты числителя и знаменателя передаточной функции объекта. При выполнении этих условий приступают к расчету регуляторов. Необходимое условие разрешимости задачи синтеза для многоканальных систем сводится к требованию взаимной простоты полиномиальных матриц  $D(s)$  и  $N(s)$ , а для одноканальных систем – взаимной простоты полиномов  $d(s)$  и  $n(s)$ . На примере одноканальной системы показано, что при нарушении вышесказанного требования, т. е. в случае общего нуля и полюса объекта, задачу синтеза все же можно решить, правда, решение будет получено с некоторой погрешностью.

**Ключевые слова:** линейные системы управления, одноканальные системы, полиномиальный метод синтеза, объект управления, взаимно простое представление, общие нули и полюса, корни характеристического полинома замкнутой системы, переходный процесс

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-7-20

**ВВЕДЕНИЕ**

В данной работе отдается предпочтение полиномиальному методу синтеза регуляторов [1–5], хотя достижения в разработке методов синтеза с использованием описания в пространстве состояний [1, 3, 6] и матричных передаточ-

---

\* Статья получена 01 августа 2017 г.

ных функций значительны. При полиномиальном методе синтеза считается обязательной проверка необходимых условий, при выполнении которых приступают к расчету регуляторов.

При полиномиальном синтезе многоканальных регуляторов [7–9, 10–15, 20] всегда учитывают ограничение, накладываемое на математическое описание объекта, состоящее в требовании взаимной простоты числителя и знаменателя передаточной функции объекта. Смысл этого требования заключается в исключении одинаковых нулей и полюсов [16]. Точная формулировка для многоканальных систем приведена в теореме.

**Теорема** [1, р. 272]. Для заданных полиномиальных матриц  $D(s)$  и  $N(s)$  полиномиальное матричное решение  $Y(s)$  и  $X(s)$  уравнения

$$Y(s)D(s) + X(s)N(s) = C(s)$$

существует для любой полиномиальной матрицы  $C(s)$ , если и только если  $D(s)$  и  $N(s)$  взаимно простые.

Относительно задачи синтеза регулятора полиномиальные матрицы  $D(s)$  и  $N(s)$  можно интерпретировать как знаменатель и числитель многоканального объекта, а матрицы  $Y(s)$  и  $X(s)$  – как знаменатель и числитель регулятора. Тогда  $C(s)$  – характеристическая матрица системы, которая задается в соответствии с требуемыми свойствами замкнутой системы.

Введем обозначения передаточных функций объекта и регулятора:

$$W_{ob}(s) = \frac{n(s)}{d(s)}, \quad W_r(s) = \frac{x(s)}{y(s)}.$$

Тогда *характеристический полином замкнутой системы* (ХПЗС) имеет следующий вид:

$$y(s)d(s) + x(s)n(s) = c(s).$$

Таким образом, необходимое условие разрешимости задачи синтеза для одноканальной системы сводится к требованию взаимной простоты полиномов  $d(s)$  и  $n(s)$ . Нарушим это требование и на примере одноканальной системы покажем, что в случае общего нуля и полюса задачу синтеза все же можно решать, правда, решение будет получено с некоторой погрешностью.



## 1. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ОБЩИМ НУЛЕМ И ПОЛЮСОМ

Рассмотрим случай, когда числитель и знаменатель объекта не взаимно простые. Например, в качестве объекта возьмем объект второго порядка, у которого имеется ноль и полюс, равные минус двум:

$$W_{ob}(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{(s+1)(s+2)}{(s+2)^2}. \quad (1)$$

Безусловно, следует рассматривать только устойчивый случай, так как в противном случае получим не грубую систему, в которой будут присутствовать неустойчивые процессы, не наблюдаемые по входу и выходу объекта. Выбираем степень регулятора на единицу меньше степени объекта [16–19]:

$$W_r(s) = \frac{x_1 s + x_0}{y_1 s + y_0}. \quad (2)$$

Передаточная функция (2) не изменится, если числитель и знаменатель разделить на одно и тоже число и, следовательно, можно взять  $y_1 = 1$ . Но все же этого делать не следует, так как при решении системы уравнений при вычислении параметров регулятора получим систему уравнений с недостаточным числом переменных.

Запишем *передаточную функцию замкнутой системы* (ПФЗС):

$$\begin{aligned} W_{cl}(s) &= \frac{n(s)x(s)}{d(s)y(s) + n(s)x(s)} = \\ &= \frac{(s^2 + 3s + 2)(x_1 s + x_0)}{\underbrace{(s^2 + 4s + 4)(y_1 s + y_0) + (s^2 + 3s + 2)(x_1 s + x_0)}_{c(s)}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Знаменатель правой части выражения (3) – это характеристический полином замкнутой системы. Зададим корни желаемого ХПЗС равными  $\{-3, -3, -3\}$ :

$$\begin{aligned} (y_1 + x_1)s^3 + (4y_1 + y_0 + 3x_1 + x_0)s^2 + (4y_1 + 4y_0 + 2x_1 + 3x_0)s + 4y_0 + 2x_0 = \\ = s^3 + 9s^2 + 27s + 27. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнения (4) легко получить линейное матричное уравнение  $Ax = b$  [19], где вектор  $x$  включает коэффициенты регулятора:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 4 & 1 & 3 & 1 \\ 4 & 4 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_0 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_x = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 9 \\ 27 \\ 27 \end{pmatrix}}_b. \quad (5)$$

Уравнение (5) неразрешимо, так как  $\text{rank}(A) = 3$  и обусловленность  $\text{cond}(A) = 1,16 \cdot 10^{16}$  подтверждает вырожденность матрицы  $A$ . Тем не менее попробуем найти приближенное решение, для чего перенесем вправо первый столбец из матрицы  $A$ , так как он линейно зависимый, с соответствующим неизвестным коэффициентом  $y_1$ :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \\ 4 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}}_{\bar{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} y_0 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_{\bar{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 9 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \end{pmatrix}}_{\bar{b}}. \quad (6)$$

Из первого уравнения (6) следует, что  $x_1 = 1$ . Тогда в (6) матрица  $\bar{A}$  размером  $4 \times 3$  преобразуется в матрицу  $\bar{\bar{A}}$  размером  $3 \times 3$ . После введения новых обозначений получим

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 4 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}}_{\bar{\bar{A}}} \underbrace{\begin{pmatrix} y_0 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_{\bar{\bar{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 9 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \end{pmatrix}}_{\bar{\bar{b}}}. \quad (7)$$

Ранг матрицы  $\bar{\bar{A}}$  равен трем и обусловленность  $\text{cond}(\bar{\bar{A}}) = 18,4$ . Найдем решение (7):

$$\bar{\bar{x}} = \bar{\bar{A}}^{-1} \bar{\bar{b}} = (7,88 - y_1; \quad 1,12; \quad -2,25)^t,$$

откуда  $y_0 = 7,88 - y_1$ ,  $x_1 = 1,12$ ,  $x_0 = -2,25$ . Получили противоречие  $x_1 = 1$  и  $x_1 = 1,12$ . Возьмем  $x_1$  среднее:  $x_1 = 1,06$ . Тогда регулятор

$$W_r(s) = \frac{x_1 s + x_0}{y_1 s + y_0} = \frac{1,12s - 2,25}{y_1 s + (7,88 - y_1)}. \quad (8)$$

Используя (3) и (8), можем записать ПФЗС:

$$\begin{aligned} W_{cl}(s) &= \frac{(s^2 + 3s + 2)(1,06s - 2,25)}{(s^2 + 4s + 4)(y_1 s + (7,88 - y_1)) + (s^2 + 3s + 2)(1,06s - 2,25)} = \\ &= \frac{1,06s^3 + 1,11s^2 - 4,51s - 4,5}{(y_1 + 1,06)s^3 + (3y_1 + 8,99)s^2 + 27s + (27 - 4y_1)}. \end{aligned}$$

Если зададим  $y_1 = 0,01$ , то получим полюса замкнутой системы  $-3,13 \pm 1,68i$  и  $-2$ . Если зададим  $y_1 = 0,003$ , то получим корни ХПЗС  $-3,16 \pm 1,66i$  и  $-2$ . И, наконец, при  $y_1 = 0$  получим корни  $-3,16 \pm 1,68i$  и  $-1,99$ , что соответствует ПД-регулятору. Таким образом, **точное решение не получено, но приближенное решение удовлетворительное.**

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНК ПРИ ПОИСКЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Уравнение (6) слева умножим на  $\bar{A}^t$ :

$$\bar{A}^t \bar{A} \bar{x} = \bar{A}^t \bar{b}$$

и подставим  $\bar{A}$  из (6):

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \\ 4 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \\ 4 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \\ 4 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 9 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \\ 27 - 4y_1 \end{pmatrix}.$$

Раскроем

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 33 & 11 & 21 \\ 11 & 14 & 9 \\ 21 & 9 & 14 \end{pmatrix}}_{\bar{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} y_0 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_{\bar{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 225 - 33y_1 \\ 82 - 11y_1 \\ 144 - 21y_1 \end{pmatrix}}_{\bar{b}}. \quad (9)$$

Итак, из выражения (9) следует  $\bar{x} = \bar{A}^{-1}\bar{b}$ , что позволяет найти неизвестные параметры вектора  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = (7,82 - y_1; 1,09; -2,15)^t. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что  $y_0 = 7,82 - y_1$ ,  $x_1 = 1,09$  и  $x_0 = 2,15$ . Передаточная функция регулятора будет равна

$$W_r(s) = \frac{x_1 s + x_0}{y_1 s + y_0} = \frac{1,09s - 2,15}{y_1 s + (7,82 - y_1)}.$$

Исследуем зависимость корней ХПЗС от свободного параметра  $y_1$ , для чего выпишем передаточную функцию замкнутой системы

$$\begin{aligned} W_{cl}(s) &= \frac{(s^2 + 3s + 2)(1,09s - 2,15)}{(s^2 + 4s + 4)(y_1 s + 7,82 - y_1) + (s^2 + 3s + 2)(1,09s - 2,15)} = \\ &= \frac{1,09s^3 + 1,12s^2 - 4,27s - 4,3}{(y_1 + 1,09)s^3 + (3y_1 + 8,94)s^2 + 27s + (27 - 4y_1)}. \end{aligned}$$

На рис. 1 приведены корневые годографы при  $y_1 \in [-0,3; 3]$ . Например, при  $y_1 = 0,04$  полюса системы равны  $-3 \pm 1,67i$  и  $-2$ , что соответствует

$$W_{cl}(s) = \frac{1,09s^3 + 1,12s^2 - 4,27s - 4,3}{1,13s^3 + 9,06s^2 + 27s + 26,84}. \quad (11)$$

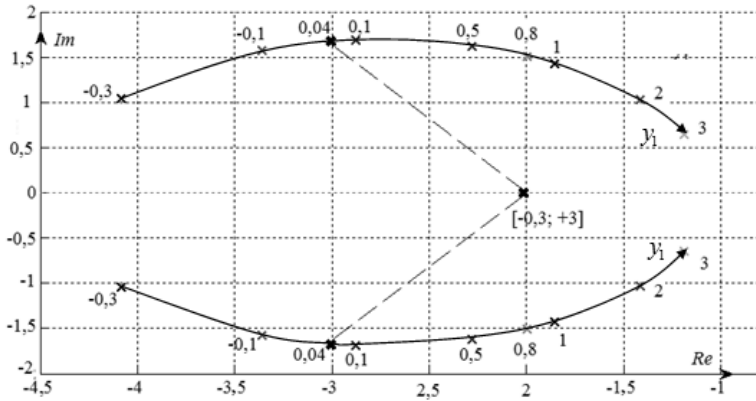


Рис. 1. Корневые годографы полюсов замкнутой системы при  $y_1 \in [-0, 3; 3]$

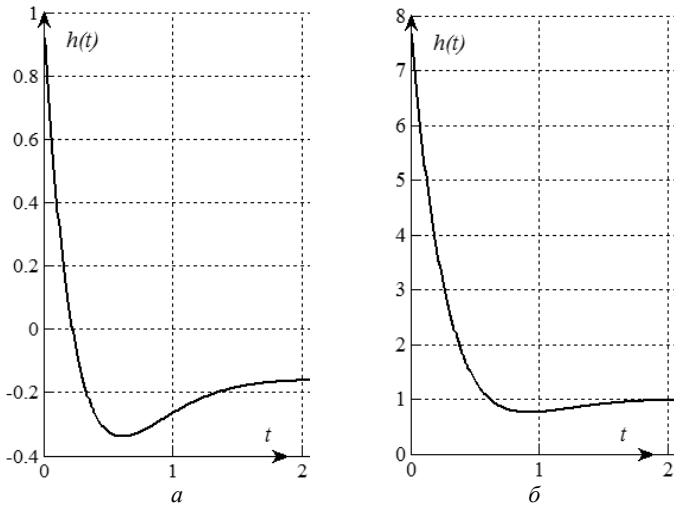


Рис. 2. Переходный процесс в системе:

$a$  – объект в не взаимно простом виде;  $b$  – объект во взаимно простом виде

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из результатов исследования, легко получить полюса системы, близкие к желаемым. Переходный процесс для этого случая приведен на рис. 2, б, откуда получаем подтверждение, что система астатическая. Кроме того, время переходного процесса равно 1,5 с и перерегулирование отсутствует. Значения  $W_{cl}(0)$  и  $W_{cl}(\infty)$  равны:

$$W_{cl}(0) = 1, \quad W_{cl}(s)|_{s \rightarrow \infty} = \frac{(7,79 + 19,66) / s + 11,88 / s^2}{1 + 6 / s + 11,88 / s^2} = 7,79,$$

что полностью соответствуют графику переходного процесса. Точного решения нет, но приближенное решение может быть удовлетворительным.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Для сравнения приведем расчет регулятора для объекта (1) в предположении, что общий множитель числителя и знаменателя сокращен:

$$W_{ob}(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{s+1}{s+2}. \quad (\text{П1})$$

В отличие от случая, рассмотренного в основном тексте статьи, здесь потребуем обеспечение астатизма системы, для чего выбираем степень регулятора равным степени объекта и полагаем  $y_0 = 0$  [16]:

$$W_r(s) = \frac{x_1 s + x_0}{y_1 s}. \quad (\text{П2})$$

Запишем ПФЗС:

$$W_{cl}(s) = \frac{n(s)x(s)}{d(s)y(s) + n(s)x(s)} = \frac{x_1 s^2 + (x_1 + x_0)s + x_0}{(y_1 + x_1)s^2 + (2y_1 + x_1 + x_0)s + x_0}. \quad (\text{П3})$$

Зададим корни желаемого ХПЗС в соответствии с расчетами второго раздела:  $-3 \pm 1,67i$ :

$$(y_1 + x_1)s^2 + (2y_1 + x_1 + x_0)s + x_0 = s^2 + 6s + 11,79.$$

Это позволяет записать систему линейных уравнений относительно неизвестных параметров регулятора

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ x_1 \\ x_0 \end{pmatrix}}_x = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 11,79 \end{pmatrix}}_b,$$

или

$$Ax = b. \quad (\text{П4})$$

Ранг матрицы  $A$  равен трем, а обусловленность – 8,34. Из уравнения (П4) определяем параметры регулятора:

$$(y_1; x_1; x_0)^t = A^{-1}b = (-6,79; 7,79; 11,79)^t.$$

Получаем регулятор

$$W_r(s) = \frac{7,79s + 11,79}{-6,79s},$$

что соответствует передаточной функции замкнутой системы

$$W_{cl}(s) = \frac{7,79s^2 + 19,66s + 11,88}{s^2 + 6s + 11,88}. \quad (\text{П5})$$

При выполнении необходимых требований взаимной простоты числителя и знаменателя объекта получаем полюса системы, незначительно отличающиеся от требуемых, что объясняется вычислениями с точностью три знака после запятой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 3<sup>rd</sup> ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
2. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1984. – 636 p.
3. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

4. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
5. *Гайдук А.Р.* Теория автоматического управления: учебник. – М.: Высшая школа, 2010. – 415 с.
6. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза в пространстве состояний // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 1 (59). – С. 25–34.
7. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.
8. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.
9. *Бобобеков К.М.* О структурных преобразованиях многоканальных линейных систем в матричном полиномиальном представлении // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 2 (67). – С. 7–25.
10. *Бобобеков К.М., Воевода А.А.* Синтез двухканальной системы полиномиальным методом: обеспечение астатизма // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 1 (83). – С. 7–19.
11. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
12. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.
13. *Воевода А.А., Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
14. *Воевода А.А., Бобобеков К.М.* Синтез линейных многоканальных регуляторов с использованием структурных преобразований // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 7–20.
15. *Воевода А.А., Бобобеков К.М.* Решение линейной системы уравнений в задаче синтезе регуляторов полиномиальным методом // Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства: сборник статей всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 14–17 ноября, 2017. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 244–249.
16. *Бобобеков К.М.* О нормировании полиномов знаменателей объекта и регулятора при полиномиальном методе синтеза // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 7–24.



17. Бобобеков К.М., Воевода А.А. Расчет параметров регулятора для стабилизации перевернутого маятника по углу отклонения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 18–32.

18. Бобобеков К.М. Полиномиальный метод синтеза одноканальной двухмассовой системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 25–36.

19. Воевода А.А., Ижицкая Е.А. Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 2 (56). – С. 3–10.

20. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Оценка параметров перевернутого маятника в системе стабилизации углового положения // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 3 (61). – С. 110–118.

**Воевода Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

**Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович**, специалист по технологиям машиностроения, 2008–2013 гг. – кафедра «Технология машиностроения металлорежущих станков и инструментов» механико-технологического факультета Таджикского технического университета (ТТУ) им. акад. М.С. Осими. С 2013 по 2015 г. ассистент Таджикского технического университета. С 2015 г. аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. Имеет более 20 публикаций. E-mail:kurbon\_111@mail.ru

### **About the necessary conditions of existence of the solution in polynomial method of synthesis of single-channel systems \***

**A.A. Voevoda<sup>1</sup>, K.M. Bobobekov<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department Automatics. E-mail: kurbon\_111@mail.ru

The problem of the polynomial method of synthesis of single-channel systems is solved in the case when the polynomials of the numerator and denominator of the object are not mutually

---

\* Received 01 August 2017.

simple. Usually, are taken into account the constraint imposed on the mathematical description of an object in the polynomial synthesis of multichannel regulators, consisting in the requirement of mutual simplicity of the numerator and the denominator of the object's transfer function. When these conditions are met, the regulators are calculated. The necessary condition for the solvability of the synthesis problem for multichannel systems is reduced to the requirement of mutual simplicity of the polynomial matrices  $D(s)$  and  $N(s)$ , and for one-channel systems, the mutual simplicity of  $d(s)$  and  $n(s)$ . Using the example of a single-channel system, it is shown that if the above-stated requirement is violated, that is, in the case of a common zero and the object pole, the synthesis problem can still be solved, although the solution will be received with some error.

**Keywords:** linear control systems, single-channel systems, polynomial synthesis method, control object, mutually simple representation, common zeros and poles, roots of the characteristic polynomial of a closed system, transient process

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-7-20

## REFERENCES

1. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.
2. Chen C.T. *Linear system theory and design*. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1984. 636 p.
3. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 1. *Lineinye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 1. Linear]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 288 p.
4. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polynomial'nyi podkhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 360 p.
5. Gaiduk A.R. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 415 p.
6. Voevoda A.A., Shoba E.V. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza v prostranstve sostoyanii [Stabilisation of two-mass system: a modal method of synthesis with using state space]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (59), pp. 25–34.
7. Voronoi V.V. *Polynomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for calculating the multi-channel controllers low order. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.
8. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polynomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multi-channel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

9. Bobobekov K.M. O strukturnykh preobrazovaniyakh mnogokanal'nykh lineinykh sistem v matrichnom polinomial'nom predstavlenii [About structural transformations of multichannel linear systems in the matrix polynomial representation]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 2 (67), pp. 7–25.

10. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Sintez dvukhkanal'noi sistemy polinomial'nym metodom: obespechenie astatizma [Synthesis of two-channel system polynomial method: ensuring astatic]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (83), pp. 7–19.

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

12. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya [Stabilisation of two-mass system by a modal method of synthesis with polynomial factorization]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 195–198.

13. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multi-channel 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.

14. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Sintez lineinykh mnogokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem strukturnykh preobrazovaniy [Synthesis of linear multi-channel regulators using structural transformations]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2017, no. 3, pp. 7–20.

15. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. [Solution of a linear system of equations in the problem of regulator synthesis by a polynomial method]. *Intellektual'nyi analiz signalov, dannykh i znanii: metody i sredstva: sbornik statei vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Intellectual analysis of signals, data and knowledge: methods and means: All-Russian scientific-practical conference with international participation]*, Novosibirsk, November 14–17, 2017, pp. 244–249.

16. Bobobekov K.M. O normirovaniy polinomov znamenatelei ob"ekta i regulyatora pri polinomial'nom metode sinteza [About rationing polynomials denomi-

nator object and regulator during polynomial method of synthesis]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 7–24.

17. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Raschet parametrov regulatora dlya stabilizatsii perevernutogo mayatnika po uglu otkloneniya [Calculation of controller parameters for the stabilization of the inverted pendulum by corner deviation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 18–32.

18. Bobobekov K.M. Polinomial'nyi metod sinteza odnokanal'noi dvukhmassovoi sistemy [A polynomial method for the synthesis of single-channel two-mass system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 25–36.

19. Voevoda A.A., Izhitskaya E.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza [Stabilization of two-mass systems: modal synthesis method]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 2 (56), pp. 3–10.

20. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Otsenka parametrov perevernutogo mayatnika v sisteme stabilizatsii uglovogo polozheniya [Inverted pendulum evaluation parameters in stabilization system of angular position]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2017, no. 3 (61), pp. 110–118.

Для цитирования:

Воевода А.А., Бобобеков К.М. О необходимом условии существования решения при полиномиальном методе синтеза одноканальных систем // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 7–20.

For citation:

Voevoda A.A., Bobobekov K.M. O neobkhdimom uslovii sushchestvovaniya resheniya pri polinomial'nom metode sinteza odnokanal'nykh sistem [About the necessary conditions of existence of the solution in polynomial method of synthesis of single-channel systems]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 7–20.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 621.825.65

### РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОГО СУСТАВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ\*

И.А. ЗАХАРОВ<sup>1</sup>, И.Н. УСТЮГОВА<sup>2</sup>, Т.С. ПОПОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: ustyugova.irina@mail.ru

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: tanuaporova14@yandex.ru

В данной статье описывается процесс разработки наиболее эффективной для применения в робототехнике конструкции искусственного шарового шарнирного сустава. Критерием эффективности является отношение числа степеней свобод к энергозатратам на движение. Приводится анализ существующих искусственных и естественных суставов, а именно: суставов млекопитающих, эндопротезов и применяемых в робототехнике различных типов шарниров (одноосных, двуосных). В результате анализа были выявлены достоинства и недостатки существующих конструкций. Было решено создать такой сустав, который сочетал бы в себе основные преимущества всех рассмотренных вариантов. За основу был взят эндопротез, применяемый в медицине. Медицинский сустав обладает наибольшей подвижностью и имеет три степени свободы. Такие эндопротезы изготавливаются из дорогостоящих материалов, поэтому экономически нецелесообразно использовать их в робототехнике. Чтобы минимизировать затраты, для производства деталей использовалась технология послойной 3D-печати ABS-пластиком. Для обеспечения износостойкости пластиковых деталей в процессе эксплуатации сустава было решено заполнить сустав веществом, подобным синовиальной жидкости. Разработанный прототип обладает высокой подвижностью и простотой актуации, что делает его пригодным для выполнения широкого круга задач.

**Ключевые слова:** искусственный сустав, робототехника, 3D-печать, степень свободы, робот, android, эндопротез, шарнир, кардан, штифт

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-21-32

---

\* Статья получена 23 октября 2017 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В наше время робототехника развивается стремительными темпами. Роботы способны лучше человека справиться с монотонной работой и работой, где нужна точность, выносливость, терпение. Они могут помогать человеку в быту: уже существуют роботы-уборщики и роботы-секретари. Кроме того, механические помощники могут сохранить немало жизней, заменяя человека при проведении опасных работ.

Конструкция и внешний вид робота могут сильно отличаться в зависимости от функций, которые он выполняет. Особый интерес представляют животноподобные роботы и человекоподобные андройды. Создание таких роботов – очень сложный процесс, потому что трудно наделить механическое устройство свойствами живого существа.

Движения роботов не такие плавные, а в качестве суставов обычно используются шарниры, которые ограничивают движение конечности робота только по одной оси и обладают всего одной степенью свободы. Есть и другие виды суставов, обеспечивающие движение конечности по двум осям и имеющие две-три степени свободы. Но такие суставы применяются не так часто из-за сложности конструкции.

Целью работы является анализ существующих искусственных и естественных суставов, а также разработка наиболее эффективной для применения в робототехнике конструкции сустава, пригодной для выполнения широкого круга задач. Критерием эффективности является отношение числа степеней свобод к энергозатратам на движение.

## **1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СУСТАВОВ**

### **1.1. СУСТАВЫ МЛЕКОПИТАЮЩИХ**

Для начала было решено изучить строение суставов млекопитающих. Они различны по строению и предназначению.

Самый распространенный тип суставов в организме – синовиальный (сустав, в котором окончания костей сходятся в капсуле, заполненной синовиальной жидкостью).

Суставные окончания костей покрыты упругим тонким слоем гладкого вещества – гиалиновым хрящом, который предотвращает трение костей, а синовиальная жидкость выполняет функцию смазки, защищая хрящи от стирания и износа. Синовиальная жидкость также служит амортизатором. Основным компонентом синовиальной жидкости является гиалуроновая кислота. Она позволяет суставам выполнять свои функции в полном объеме [6].

Синовиальные суставы, в свою очередь, можно разделить на несколько обобщенных подвидов (см. таблицу).

### Классификация суставов по форме суставных поверхностей и числу осей вращения [7]

Осность сустава	Сустав по форме суставной поверхности	Число видов движения	Реализуемая ось	Реализуемое движение
Одноосные	Цилиндрический	1	Вертикальная	Вращение
	Блоковидный	2	Фронтальная	Сгибание, разгибание
	Улитковый (разновидность блоковидного)			
Двухосные	Эллипсоидный	5	Фронтальная	Сгибание, разгибание
	Седловидный		Сагиттальная	Отведение, приведение
			Переход с оси на ось	Круговое движение
	Мышелковый	3	Фронтальная	Сгибание, разгибание
			Вертикальная	Вращение
Многоосные	Шаровидный	6	Фронтальная	Сгибание, разгибание
	Чашеобразный (разновидность шаровидного)		Сагиттальная	Отведение, приведение
			Переход с оси на ось	Круговое движение
	Плоский		Вертикальная	Вращение

Шаровидный сустав – это самое подвижное сочленение в организме человека, которое обеспечивает возможность выполнять разнообразные движения верхней конечностью. Примерами такого сустава могут послужить плечевой и тазобедренный суставы. Движения в них возможны по всем трем осям. Рассмотрим строение такого сустава на примере плечевого.

Верхняя часть кости плеча заканчивается круглой головкой, имеющей шаровидную форму. Напротив нее находится лопатка, входящая в состав поя-

са верхних конечностей. Ее плоскость, обращенная к плечевой кости, имеет углубление, которое в точности повторяет форму шаровидного образования плеча. Это углубление называется суставной впадиной, но ее размер почти в четыре раза меньше, чем диаметр головки плеча (рис. 1).

Строение плечевого сустава таково, что при любых движениях в нем суставная впадина лопатки всегда оказывается напротив головки плеча, во многом это обеспечивается и вращательными движениями самой лопатки.

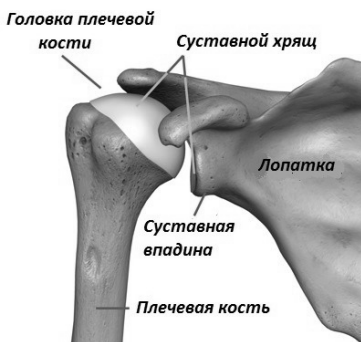


Рис. 1. Строение плечевого сустава

## 1.2. МЕДИЦИНСКИЕ ЭНДОПРОТЕЗЫ

В настоящее время возможно заменять практически все виды суставов: тазобедренный, коленный, локтевой, плечевой, голеностопный и лучезапястный, а также суставы пальцев ног и рук, межпозвоночные диски.

Чтобы искусственные суставы хорошо приживались и функционировали в теле человека, они должны быть схожи с человеческими.

Рассмотрим, как устроены некоторые из них.

Шаровидный эндопротез состоит из круглой головки и вогнутой впадины, в которой головка вращается, позволяя осуществить движение. Обычно протез состоит из ножки, головки, чашки и вкладыша (рис. 2). Для их производства используют разные материалы: металл, керамику и полиэтилен соответственно [5].

Шарнирный эндопротез устроен по-другому. Например, для коленного сустава он состоит из трех основных частей: большеберцовый компонент заменяет верхнюю поверхность голени. Бедренный компонент заменяет нижнюю поверхность бедра и углубление, в которое входит коленная чашечка. Надколенный компонент заменяет поверхность надколенника, где он



скользит в углублении на бедре. Части сустава изготавливаются из металла и полиэтилена (рис. 3).

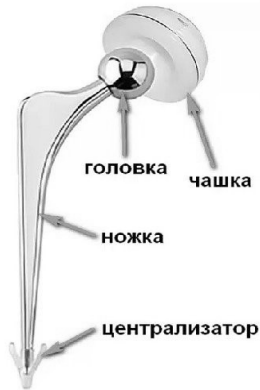


Рис. 2. Шаровидный сустав



Рис. 3. Шарнирный сустав

Медицинские эндопротезы очень схожи с суставами млекопитающих, но их применение в робототехнике не целесообразно с экономической точки зрения, так как они производятся из дорогостоящих материалов по сложной технологии. К тому же выбор материала для эндопротезов ограничен, потому что нужно подобрать такой материал, который мог бы «прижиться» в теле человека.

### 1.3. ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РОБОТОТЕХНИКЕ ШАРНИРЫ

В робототехнике используются другие технологии.

Самым простым суставом является одноосный сустав с использованием штифта в конструкции.

Штифт плотно вставляется в отверстие, проходящее через обе детали, предотвращая их взаимное смещение. Это позволяет обеспечить движение, но только по одной оси.



Рис. 4. Одноосный сустав с использованием штифта

Благодаря простоте и малым затратам на его изготовление такой тип сустава (рис. 4) часто используют в роботостроении.

Собрав конструкцию, состоящую из двух деталей со штифтами, можно получить сустав, движение которого будет обеспечено по двум осям. Такая конструкция называется кардан.

Кардан – механизм, передающий крутящий момент между валами, пересекающимися в центре карданной передачи и имеющий возможность взаимного углового перемещения (рис. 5) [8]. Используется, когда трудно обеспечить соосность вращающихся элементов.

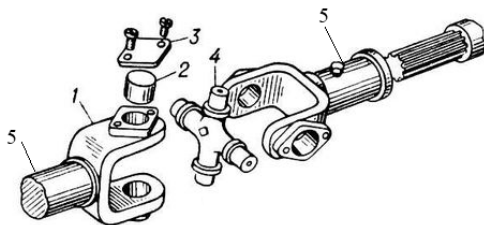


Рис. 5. Кардан:

1 – вилка; 2 – опора для цапф крестовины;  
3 – крышка; 4 – крестовина; 5 – вал

С развитием робототехники нашлось применение и кардану, уже не только в качестве вращающейся вокруг продольных осей трансмиссии, но и в виде непосредственных частей суставов робота.

Вследствие анализа существующих искусственных суставов были выявлены следующие недостатки.

Шарнирные суставы ограничены в движении по одной оси, поэтому у них мало степеней свободы. Конечно, этого может быть достаточно для решения простых задач. Например, данный метод может быть использован для обеспечения движения фаланг пальцев робота, локтевого и коленного суставов. Однако для выполнения более сложных функций требуются суставы, обладающие большим количеством степеней свободы.

Сустав с использованием кардана (рис. 5) решает данную задачу, но и эта конструкция не лишена недостатков. Так, для вращения конечности вокруг продольной оси (с целью обеспечения третьей степени свободы) необходимо вращать сразу оба вала. Такая усложненная форма системы и большое количество входящих в нее деталей порождают дополнительные риски ошибок в проектировании, изготовлении и сборке.

Карданная передача имеет еще один существенный недостаток – несинхронность вращения валов (если один вал вращается равномерно, то другой – нет), повышающуюся при увеличении угла между валами [8].

Таким образом, кардан может быть недостаточно эффективен для применения в качестве элемента кинематических цепей манипуляционного механизма.

На основании вышеизложенного было принято решение разработать адаптированную под нужды робототехники конструкцию искусственного сустава. Сустав должен обладать высокой подвижностью и обеспечивать возможность независимого относительного движения каждого звена в составе многозвенного манипулятора. Это позволит упростить и удешевить процедуру передачи энергии от привода к ведомому звену.

## **2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ**

В результате анализа было решено взять за основу шаровидный эндопротез. Такой механизм обеспечивает максимальную среди рассмотренных аналогов свободу движений. При этом он лишен описанных недостатков кардана: поворот вокруг продольной оси, в отличие от карданного механизма, в шаровидном суставе может быть реализован без вращения всех частей сустава, т. е. отсутствует необходимость вращения внешнего шара вместе с внутренним. Простейшие шарообразные формы и сведенное к минимуму

число соединений могут позволить организовать быстрое изготовление и сборку.

Как уже было сказано ранее, готовые эндопротезы нецелесообразно использовать в робототехнике, так как они изготовлены из дорогостоящих материалов – металла и керамики. Помимо этого, существует прямая связь между энергозатратами на движение робота и его массой. Поэтому для создания роботов используют в основном легкие составные части, чтобы снизить издержки на его эксплуатацию. Исходя из этого было решено заменить керамику и металл на пластик. Он легкий и экономически выгоден.

С помощью программных средств 3D-моделирования были разработаны виртуальные модели прототипов деталей конструкции (рис. 6).

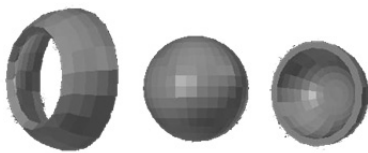


Рис. 6. Составные части сустава

Сустав состоит из внешнего и внутреннего шаров. Внутренний шар соединяется с конечностью.

Диаметр отверстия на внешнем шаре может быть изменен для того, чтобы увеличить или уменьшить амплитуду движения. При этом диаметр отверстия не должен быть больше, чем диаметр внутреннего шара. Также может быть изменена и форма отверстия. Если нужно ограничить движение по одной оси, то лучше сделать отверстие в виде щели (рис. 7).

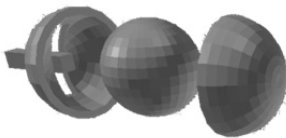


Рис. 7. Конструкция с отверстием в виде щели

Для изготовления разработанных деталей использовалась технология послойной 3D-печати ABS-пластиком, при которой расплавленный пластик слой за слоем, начиная с нижнего, автоматически выдавливается из экструдера на рабочую поверхность. Для этого виртуальная 3D-модель предварительно разделяется программой на слои в процессе слайсинга.

Полученные детали после абразивной обработки срачивались вместе при нагреве их кромки выше температуры плавления.

Изначальная идея предусматривала использование в конструкции сустава нескольких внутренних разнонаправленных групп пружинных амортизаторов, чтобы предотвратить движение конечности без приложения усилия. Однако в процессе реализации от них было решено отказаться в пользу более простого и экономичного решения, прообразом которого послужила синовиальная жидкость суставов. В качестве заполнителя внутренней суставной полости (пространства между внешним и внутренним шаром) использовался низкомолекулярный силиконовый каучук, который способен обеспечить необходимый баланс упругости и эластичности.

В процессе эксплуатации прототипа был выявлен следующий недостаток: со временем силиконовый каучук начинает «скатываться» и выпадать из полости сустава. Это приводит к расшатыванию конечности, заключенной в сустав. Данную проблему можно устранить, используя аналог синовиальной сумки, роль которой может выполнить слой полиэтилена.

## **БЛАГОДАРНОСТЬ**

Авторы выражают искреннюю благодарность:

– профессору кафедры автоматике А.А. Воеводе за стимулирование студентов к научно-инновационной деятельности, а также полезное обсуждение полученных результатов;

– магистру кафедры ССОД П.О. Бекетову за обучение основам 3D-печати и предоставленный 3D-принтер.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате работы была спроектирована эффективная для применения в робототехнике конструкция многоосного шарнира, который выполняет роль сустава. Методом послойной 3D-печати был изготовлен первый прототип.

Разработанный сустав обладает высокой подвижностью и простотой актуации. Для того чтобы пластиковые детали не деформировались в результате трения друг о друга, используется амортизирующая жидкость (силиконовый каучук). В будущем планируется модернизировать данную конструкцию, внедрив аналог синовиальной сумки, что позволит увеличить надежность и долговечность механизма.

В перспективе применяемые и развиваемые авторами технологичные конструктивные решения могут позволить добиться успехов в качественном развитии робототехники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степени свободы (механика) [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Степени\\_свободы\\_\(механика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Степени_свободы_(механика)) (дата обращения: 10.11.2017).
2. *Корендяев А.И., Саламанора Б.Л., Тывес Л.И.* Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Наука, 2006. – 376 с.
3. *Максимов А.Л., Горбач Е.Н., Каминский А.В.* Анализ причин асептической нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава компании «Алтимед» // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5.
4. Асептическая нестабильность эндопротеза [Электронный ресурс]. – URL: <https://femurhead.ru/asepticheskaya-nestabilnost-endoproteza/> (дата обращения: 18.11.2017).
5. Эндопротезирование суставов [Электронный ресурс]. – URL: <http://present5.com/endoprotezirovanie-sustavov-protez-iskusstvennoe-prisposoblenie/> (дата обращения: 14.11.2017).
6. *Курепина М.М., Ожигова А.П., Никитина А.А.* Анатомия человека. – М.: Владос, 2010. – 383 с.
7. *Гайворонский И.В., Ничипорук Г.И., Гайворонский А.И.* Анатомия и физиология человека: учебник. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2011. – 496 с.
8. *Бекурин М.* Карданная передача [Электронный ресурс]. – URL: <http://inoschool.ru/item/208-17-kardannaya-peredacha> (дата обращения: 25.11.2017).
9. Суставы скелета человека [Электронный ресурс]. – URL: [http://house-massage.ru/sustavy\\_skeleta\\_cheloveka.html](http://house-massage.ru/sustavy_skeleta_cheloveka.html) (дата обращения: 19.11.2017).
10. *Булгаков А.Г., Воробьев В.А.* Промышленные роботы: кинематика, динамика, контроль и управление. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 488 с.
11. *Глазков В.А., Яхричев В.В.* Основы робототехники. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 31 с.
12. *Бекетов П.О.* Разработка роботизированной искусственной кисти с помощью технологии 3d прототипирования / науч. рук. В.И. Гужов // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 6. – С. 43–44.

*Захаров Илья Александрович*, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru](mailto:z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru)

*Устюгова Ирина Николаевна*, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [ustugova.irina@mail.ru](mailto:ustugova.irina@mail.ru)

**Попова Татьяна Сергеевна**, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: tanyapopova14@yandex.ru

## The development of a joint, is most effective for use in robotics\*

I.A. Zakharov<sup>1</sup>, I.N. Ustyugova<sup>2</sup>, T.S. Popova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: ustyugova.irina@mail.ru

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: tanyapopova14@yandex.ru

This article describes the development process most effective for use in the construction of the robot accusation machine of the hinge joint. Criteria of efficiency is the ratio of the number of step to freedom energy movement. The analysis of various artificial and natural joints is given, namely: joints of mammals, endoprostheses and various types of hinges (uniaxial, biaxial) used in robotics. As a result of the analysis, advantages and disadvantages of all designs were revealed. It was decided to create a joint that would combine the main advantages of all the options considered. The endoprosthesis used in medicine was taken as a basis. The medical joint has the greatest mobility and has 3 degrees of freedom. Such endoprostheses are made of expensive materials, so it is economically inexpedient to use them in robotics. 3D printing with ABS plastic. To ensure the wear resistance of plastic parts during the operation of the joint, it was decided to fill the joint with a synovial fluid. The developed prototype has a high mobility and ease of actualy, which makes it suitable for a wide range of tasks.

**Keywords:** artificial joint, robotics, 3D printing, degree of freedom, robot, android, endoprosthesis, hinge, cardan, pin

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-21-32

## REFERENCES

1. *Stepeni svobody (mekhanika)* [Degrees of freedom (mechanics)]. *Vikipediya: svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia: the free encyclopedia]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Stepeni\\_svobody\\_\(mekhanika\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Stepeni_svobody_(mekhanika)) (accessed 10.11.2017).
2. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskie osnovy robototekhniki*. V 2 kn. Kn. 2 [Theoretical basis of robotics. In 2 bk. Bk. 2]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 376 p.

---

\* Received 23 October 2017.

3. Maksimov A.L., Gorbach E.N., Kaminskii A.V. Analiz prichin aseptichestskoi nestabil'nosti endoproteza tazobedrennogo sustava kompanii "Altimed" [Analysis of the causes aseptic instability of "Altimed" company hip endoprosthesis]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 5.

4. *Asepticheskaya nestabil'nost' endoproteza* [Aseptic instability of the endoprosthesis]. Available at: <https://femurhead.ru/asepticheskaya-nestabilnost-endoproteza/> (accessed 18.11.2017).

5. Endoprotezirovanie sustavov [Endoprosthesis of joints]. Available at: <http://present5.com/endoprotezirovanie-sustavov-protez-iskusstvennoe-prisposoblenie/> (accessed 14.11.2017).

6. Kurepina M.M., Ozhigova A.P., Nikitina A.A. *Anatomiya cheloveka* [Human anatomy]. Moscow, Vldos Publ., 2010. 383 p.

7. Gaivoronskii I.V., Nichiporuk G.I., Gaivoronskii A.I. *Anatomiya i fiziologiya cheloveka* [Anatomy and physiology of man]. 6th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2011. 496 p.

8. Bekurin M. *Kardannaya peredacha* [Cardan transmission]. Available at: <http://inoschool.ru/item/208-17-kardannaya-peredacha> (accessed 25.11.2017).

9. *Sustavy skeleta cheloveka* [Joints of the human skeleton]. Available at: [http://house-massage.ru/sustavy\\_skeleta\\_cheloveka.html](http://house-massage.ru/sustavy_skeleta_cheloveka.html) (accessed 19.11.2017).

10. Bulgakov A.G., Vorob'ev V.A. *Promyshlennyye roboty: kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie* [Industrial robots: kinematics, dynamics, control and management]. Moscow, Solon-Press Publ., 2007. 488 p.

11. Glazkov V.A., Yakhrichev V.V. *Osnovy robototekhniki* [Basics of Robotics]. Vologda, VoGU Publ., 2014. 31 p.

12. Beketov P.O. [Development of a robotic artificial hand using 3D prototyping technology]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 5–9 December 2015, pt. 6, pp. 43–44. (In Russian).

Для цитирования:

Захаров И.А., Устюгова И.Н., Попова Т.С. Разработка искусственного сустава для применения в робототехнике // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 21–32.

For citation:

Zakharov I.A., Ustyugova I.N., Popova T.S. Razrabotka iskusstvennogo sustava dlya primeneniya v robototekhnike [The development of a joint, is most effective for use in robotics]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 21–32.



УДК 621.396

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АППАРАТУРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСТАНЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ\*

Б.И. ФИЛИПPOB<sup>1</sup>, А.О. КОЖАЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filiprovboris@rambler.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры защиты информации. E-mail: Anna.Kozhaeva@yandex.ru

Объектом исследования являются системы измерения дистанции между объектами, разделенными водной средой. Цель работы – разработка аппаратуры определения времени распространения акустических сигналов между объектами в воде на основе привязки «часов», установленных на объектах, к шкале единого времени. Определение дистанции  $D$  от объекта измерения (ОИ) до многофункциональной гидроакустической станции (МГАС) в составе оперативного гидроакустического измерительного комплекса (ОГИК) может осуществляться расчетным методом на основе измерения времени распространения  $t$  акустического сигнала между ОИ и МГАС. Для измерения времени распространения акустического сигнала от ОИ до МГАС на ОИ и МГАС размещают взаимно засинхронизированные часы. Отсчет моментов передачи  $t_i$  осуществляется по часам ОИ. Сигнал  $S(t)$ , распространяясь в пространстве, достигает точки нахождения станции. На МГАС осуществляется прием сигнала, фиксируется по часам станции момент обнаружения  $t_j$  этого сигнала. На основании информации о моментах передачи из ОИ сигнала, имеющейся на станции, осуществляется определение времени распространения  $\Delta t$  акустического сигнала между ОИ и МГАС. Предложено в качестве образцового генератора применить отечественную аппаратуру частотно-временной синхронизации МРК–23. Применение аппаратуры МРК позволяет организовать привязку составных частей аппаратуры СИД к шкале единого времени путем записи в память в моменты начала и окончания сеанса измерения 13-байтных блоков данных, содержащих информацию о величине смещения внутренней временной шкалы МРК относительно абсолютной временной шкалы и использовании этой информации на этапе обработки данных измерений. Предложены структурные схемы, входящие в состав аппаратуры СИД, и унифицированные модули СИД–МГАС, СИД–ОИ, СИД–К.

---

\* Статья получена 06 октября 2017 г.

**Ключевые слова:** гидроакустический канал, система измерения дальности, передача и прием гидроакустического сигнала, объект измерения, многофункциональная гидроакустическая станция, оперативный гидроакустический измерительный комплекс, шкала единого времени, частотно-временная синхронизация

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-33-48

## ВВЕДЕНИЕ

Особенности гидроакустических каналов связи были рассмотрены в работах [1–4]. В частности, в [1, 2] исследовались статистические характеристики сигналов и помех, в [3, 4] принципы построения гидроакустических систем и их энергетические характеристики.

Объектом данного исследования является система измерения дистанции (СИД) между объектами, разделенными водной средой.

Определение дистанции  $D$  от объекта измерения (ОИ) до многофункциональной гидроакустической станции (МГАС) в составе оперативного гидроакустического измерительного комплекса (ОГИК) может осуществляться расчетным методом на основе измерения времени распространения  $\tau$  акустического сигнала между ОИ и МГАС [5–12]

$$D = c\tau,$$

где  $c$  – скорость звука в воде.

Скорость звука  $c$  в точке постановки МГАС задается по результатам ее измерения штатными средствами обслуживающего судна (ОС).

Для измерения времени распространения акустического сигнала от объекта измерения до многофункциональной гидроакустической станции на ОИ и МГАС размещают взаимно засинхронизированные часы. Периодически в заранее оговоренные моменты времени  $t_i$  объект измерения передает в направлении МГАС акустический сигнал  $S(t)$ . Отсчет моментов передачи  $t_i$  осуществляется по часам ОИ.

Сигнал  $S(t)$ , распространяясь в пространстве, достигает точки нахождения станции. На МГАС осуществляется прием сигнала, фиксируется по часам станции момент обнаружения  $t_j$  этого сигнала. На основании информации о моментах передачи из ОИ сигнала, имеющейся на станции, осуществляется определение времени распространения  $\Delta t$  акустического сигнала между ОИ и многофункциональной гидроакустической станцией [13]:

$$\tau = t_i - t_j.$$

Полученное значение  $\tau$  записывается в память МГАС и далее используется при обработке результатов измерения параметров ОИ.

## **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ**

Модуль СИД–ОИ предназначен для формирования и передачи по заданной программе измерительных акустических сигналов в направлении МГАС.

Модуль СИД–МГАС предназначен для приема измерительных сигналов, передаваемых из ОИ, фиксации по часам МГАС момента обнаружения измерительного сигнала, оценки времени распространения сигнала от ОИ до станции, передачи значения указанной оценки времени распространения в ЭВМ МГАС и ее дополнительной записи в запоминающее устройство.

Модуль СИД–К предназначен для сведения частот задающих генераторов модулей СИД–ОИ и СИД–МГАС, их привязки к шкале единого времени.

## **2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АППАРАТУРЫ СИД**

### **Структурная схема модуля СИД–МГАС**

В соответствии с алгоритмом проведения измерений в оперативном гидроакустическом комплексе модуль СИД–МГАС кроме генератора секундных импульсов, привязанных к шкале единого времени, должен включать в свой состав приемник сигналов СИД, блок измерения времени распространения  $\tau$  акустического сигнала от ОИ до МГАС, запоминающее устройство (ЗУ) для хранения данных измерений, устройство передачи данных измерений в ЭВМ МГАС.

Исходя из условий унификации составных частей разрабатываемой аппаратуры, целесообразно в качестве генератора секундных импульсов применить устройство сведения частот. Из тех же соображений в качестве приемника целесообразно применить приемопередатчик сигналов СИД [7]. Дополнительным доводом в пользу применения этого приемопередатчика является то, что в нем также реализован таймер, который может быть использован для измерения времени распространения  $\tau$  акустического сигнала от ОИ до МГАС. Измерение времени распространения с помощью указанного таймера осуществляется с дискретностью 62,5 мкс. Результат измерения представляется двухбайтным числом.

Запоминающее устройство должно обеспечивать хранение данных, полученных за 72 ч измерений. При проведении измерений с периодичностью 1 с объем ЗУ  $V$  равен  $V = 72 \cdot 3600 = 259\,200$  двухбайтных слов.

Это позволяет для построения ЗУ использовать стандартные блоки памяти с организацией  $(256\text{ К} \times 16)$  бит. Результаты каждого измерения времени распространения  $\tau$  акустического сигнала от ОИ до МГАС должны подаваться на обработку в ЭВМ МГАС в последовательном виде (интерфейс RS-232). В этой связи представляется целесообразным организовать запись результатов измерения в ЗУ также в последовательном виде.

Так как привязка секундных импульсов к шкале единого (эталонного) времени осуществляется непосредственно после завершения сведения, то целесообразно момент завершения операции сведения принять за начало сеанса измерения в модуле СИД–МГАС. Для повышения эффективности использования ЗУ целесообразно перед записью в память осуществить сжатие информации. Достаточно применить простейший метод, заключающийся в представлении последовательности полностью совпадающих измеренных значений времени распространения  $\tau$  двумя словами: в первом передается само измеренное значение  $\tau$ , а во втором слове – количество совпадающих значений в последовательности. Следует ожидать, что указанный метод сжатия будет обладать наибольшей эффективностью на этапе развертывания ОГИК, пока объект измерения не начнет передачу сигналов СИД.

Указанные соображения были приняты за основу при разработке структурной схемы модуля СИД–МГАС, представленной на рис. 1.

Модуль СИД–МГАС включает в свой состав пять устройств: устройство сведения частот А1, схему А2, приемопередатчик СИД А3, управляющий микроконтроллер А4 и запоминающее устройство А5.

Работа модуля СИД–МГАС всегда начинается с операции сведения частот [13].

К входам МВ С1 и RS–232 к МПК подключается аппаратура частотно-временной синхронизации МПК–23 [14]. После подачи на УСЧ А1 от кнопки Кн1 сигнала «Сведение» начинается сведение задающего генератора, светодиод VD1 выдает соответствующий сигнал.

По завершении операции сведения на выходе УСЧ формируется сигнал СЗ (сведение завершено), загорается светодиод VD2, а светодиод VD1 прекращает свое свечение. Из управляющего микроконтроллера А4 по последовательному каналу в МПК подается запрос, в ответ на который из МПК по последовательному каналу в управляющий микроконтроллер А поступает 13-байтный пакет данных, с помощью которых осуществляется привязка секундных импульсов, формируемых в УСЧ, к шкале единого времени. В пер-

вых четырех байтах пакета передается целое число, соответствующее количеству секунд, отсчитываемых от момента времени 00 ч 00 мин 00 с соответствующего числа, месяца и года. В пятом байте – дробная часть секунды, на которую положение метки времени 1 с, выдаваемой по внутренней шкале МРК, отличается от ее положения по абсолютной шкале, дробная часть измеряется в сотых долях секунды. В оставшихся восьми байтах – число с плавающей запятой удвоенной точности, соответствующее величине рассогласования между шкалами времени МРК и абсолютного времени.

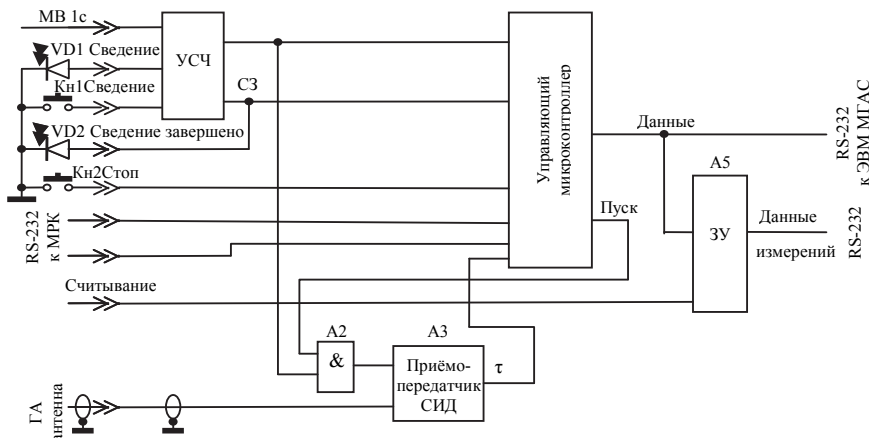


Рис. 1. Структурная схема модуля СИД–МГАС

Указанный 13-байтный пакет через управляющий микроконтроллер А4 по последовательному каналу подается в ЭВМ МГАС и запоминающее устройство А5. После этого модуль СИД–МГАС переходит в режим измерения: подается разрешение на схему А2, секундные импульсы с выхода УСЧ поступают на вход приемопередатчика СИД. По каждому из этих импульсов в приемопередатчике осуществляется прием сигнала СИД и измерение интервала времени между началом пришедшего секундного импульса и моментом обнаружения сигнала СИД.

Результат измерения с дискретностью 62,5 мкс в виде последовательного двухбайтного числа поступает в управляющий микроконтроллер А4. Формат указанного двухбайтного числа представлен на рис. 2. Если сигнал СИД приемопередатчиком не обнаруживается, то в микроконтроллер передается два байта, заполненных нулями.

В управляющем микроконтроллере А4 результат измерения обрабатывается, при необходимости происходит сжатие информации, и в виде последовательного двухбайтного числа подается в ЗУ А5 и одновременно в стандарте RS-232 – в ЭВМ МГАС.

Следует различать три рода данных, которые могут передаваться из микроконтроллера в ЗУ и в ЭВМ МГАС.

**Первая ситуация.** В ЗУ и в ЭВМ МГАС передаются результаты измерения. Из микроконтроллера подаются два байта, формат которых совпадает с форматом данных на выходе приемопередатчика СИД (рис. 2).

**Вторая ситуация.** Из микроконтроллера передаются данные в сжатом виде, с выхода микроконтроллера выдаются две пары байтов. В первой паре первый байт содержит в старшем (левом) разряде «1», остальные семь разрядов первого байта равны «0». Второй байт первой пары – целое двоичное число, на единицу меньшее количества сеансов в последовательности измерений, имеющих одинаковое значение. Во втором байте могут передаваться числа от 00000001 до 11111111. Первое число показывает, что два последовательных измерения времени задержки дали одинаковый результат. Число 11111111 показывает, что 256 выполненных подряд измерений дали одинаковый результат. Значение указанного времени задержки было передано в предыдущем цикле передачи из контроллера. Во второй паре байтов передается новое измеренное значение времени задержки, формат ее передачи описан выше и представлен на рис. 2.



Рис. 2. Формат представления результата измерения временного интервала на выходе приемопередатчика СИД

**Третья ситуация.** Из МРК поступает 13-байтный пакет данных, с помощью которого осуществляется привязка секундных импульсов к шкале единого времени. Из него в управляющем микроконтроллере формируется 14-байтный пакет, в котором перед указанным выше 13-байтным пакетом данных из МРК передается служебный байт, содержащий во втором разряде «1». Структура указанного служебного байта приведена на рис. 3.

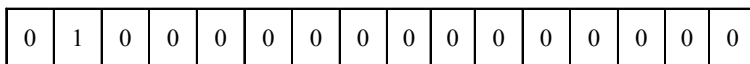


Рис. 3. Структура служебного байта, передаваемого перед 13-байтным блоком данных из МРК

Сформированный 14-байтный блок передается в ЭВМ МГАС и одновременно записывается в ЗУ А5. Представляется целесообразным осуществлять привязку секундных импульсов к шкале единого времени дважды за сеанс измерений: первый раз – по завершении операции сведения генератора, второй раз – по окончании сеанса измерений. Для этого следует на вход УСЧ модуля СИД–МГАС подключить МРК, от кнопки Кн2 подать сигнал «Стоп», по которому управляющий микроконтроллер А4 считывает из МРК 13-байтный пакет данных, с помощью которого осуществляется привязка секундных импульсов к шкале единого времени. Далее в управляющем микроконтроллере А4 формируется 14-байтный пакет, который подается в ЭВМ МГАС и записывается в ЗУ А5.

В аппаратуре предусмотрена возможность считывания информации из ЗУ А5 после окончания сеанса измерений. Запоминающее устройство реализовано на основе микросхем с энергонезависимой памятью. Поэтому считывание данных измерений может производиться как из ЗУ, находящегося в корпусе модуля СИД–МГАС, так и после извлечения ЗУ из корпуса модуля. Для считывания необходимо подключить на выход ЗУ через последовательный порт по стыку RS–232 внешнее устройство, на которое планируется произвести запись данных измерений, и подать на запоминающее устройство внешний сигнал «Считывание».

Данные из ЗУ считываются последовательно. Хранящиеся в ЗУ данные обрамлены 14-байтными блоками привязки к шкале единого времени: в начале находится 14-байтный блок привязки к шкале времени, и заканчивается массив данных измерений подобным 14-байтным блоком привязки к шкале единого времени.

### Структурная схема модуля СИД–ОИ и модуля СИД–К

Модули СИД–ОИ и СИД–К предназначены для передачи измерительных гидроакустических сигналов в моменты времени, привязанные к шкале единого времени; должна быть обеспечена возможность передачи из них сигналов с периодичностью 1, 2 или 4 с.

Применение описанного выше принципа привязки секундных импульсов, основанного на записи из МРК в запоминающее устройство и последующем использовании для обработки результатов измерений 13-байтного блока данных, показывающего величину смещения внутренней шкалы МРК от шкалы единого времени, позволяет использовать для реализации модулей СИД–ОИ и СИД–К структурную схему, аналогичную структурной схеме модуля СИД–МГАС.

Структурная схема модулей СИД–ОИ и СИД–К, приведенная на рис. 4, в основном совпадает со структурной схемой модуля СИД–МГАС с учетом четырех основных отличий:

- приемопередатчик СИД в составе модулей СИД–ОИ и СИД–К работает в режиме передачи;
- в состав модулей введены двоичный счетчик А2, который вместе с коммутатором А4 в зависимости от внешнего управляющего сигнала «Период передачи» задает периодичность излучения в направлении МГАС сигналов СИД. Периодичность выдачи сигналов СИД в канал может устанавливаться равной 1, 2, 4 или 8 с;
- в целях обеспечения электробезопасности на время выполнения операции сведения частоты задающего генератора с помощью схемы А8 происходит блокировка усилителя мощности путем отключения внешнего управляющего сигнала «Передача»;
- запоминающее устройство А6 применяется для хранения вводимого из МРК 13-байтного пакета данных, с помощью которого осуществляется привязка секундных импульсов к шкале единого времени в начале и в конце сеанса измерений.

Работа модулей СИД–ОИ, СИД–К осуществляется следующим образом. Первоначально после включения питания должен быть снят внешний управляющий сигнал «Передача», происходит блокировка схемы А8 и, соответственно, в целях электробезопасности блокируется работа усилителя мощности на входе гидроакустической антенны.

Затем к модулю подключается аппаратура МРК–23 и по сигналу «Сведения» от кнопки Кн1 начинается сведение задающего генератора. Процедура сведения задающих генераторов модулей СИД–ОИ и СИД–К полностью сов-



падает с соответствующей процедурой сведения задающего генератора, описанной выше, при рассмотрении структурной схемы модуля СИД–МГАС.

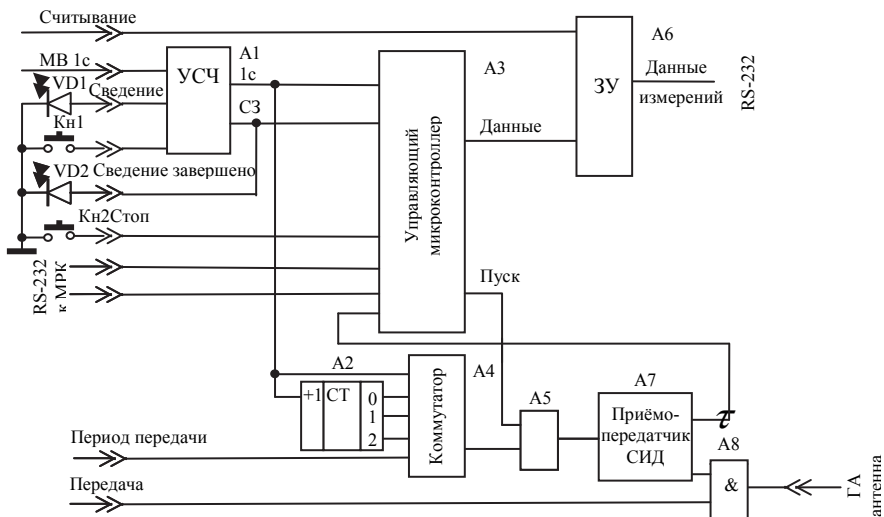


Рис. 4. Структурная схема модулей СИД–ОИ и СИД–К

После окончания операции сведения по сигналу «СЗ» (сведение завершено) с выхода УСЧ А1 осуществляется привязка секундных импульсов к шкале единого времени. Эта процедура полностью соответствует процедуре привязки секундных импульсов к шкале единого времени, выполняемой в модуле СИД–МГАС и описанной выше.

Из МРК по последовательному каналу считывается 13-байтный блок данных, показывающий величину смещения секундных импульсов от их положения по абсолютной шкале времени. Из считанного бока в управляющем микроконтроллере А3 формируется соответствующий 14-байтный пакет, который записывается в ЗУ А5. Одновременно на выходе управляющего микроконтроллера А3 формируется управляющий сигнал «Пуск».

После этого модуль переходит в режим измерения [15]. Управляющим сигналом «Пуск» с выхода управляющего микроконтроллера А3 подается разрешение на схему А5; на другой вход этой схемы с выхода коммутатора А5 подаются запускающие импульсы, которые могут следовать с периодом 1, 2, 4 или 8 с. Формирование запускающих импульсов осуществляется с помощью двоичного счетчика А4 и коммутатора А5 путем подачи на управляю-

ший вход последнего соответствующего внешнего управляющего сигнала «Период передачи».

Запускающие импульсы с выхода коммутатора А4 поступают на вход приемо-передатчика СИД А7. По каждому из этих импульсов в приемо-передатчике осуществляется формирование сигнала СИД; на выходе «т» приемо-передатчика СИД последовательность, состоящая из двух байтов, содержит логический «0». Подобный сигнал в модуле СИД–МГАС применялся для обозначения неприема сигнала СИД. Сигналы «т» с выхода приемо-передатчика СИД А7 поступают в управляющий микроконтроллер А3, где подвергаются сжатию и далее записываются в ЗУ А6.

Передача сигналов СИД в канал начинается после подачи на схему И А8 внешнего управляющего сигнала «Передача» [16], который разрешает прохождение сигналов СИД в усилитель мощности и далее его передачу в канал. В целях электробезопасности персонала рекомендуется начинать передачу сигналов СИД (подавать управляющий сигнал «Передача») после завершения процедуры сведения генераторов и выполнения всех подготовительных операций, связанных с подключением модуля к передающей гидроакустической антенне.

Организация записи в ЗУ А6 сигналов «т» позволяет осуществлять на этапе обработки данных измерений контроль правильности функционирования аппаратуры СИД, например, путем сравнения количества переданных модулями СИД–ОИ и СИД–К измерительных сигналов с количеством принятых сигналов СИД на МГАС.

Сеанс измерений должен завершаться так же, как и в модуле СИД–МГАС, осуществлением привязки секундных импульсов к шкале единого времени. Для этого необходимо предварительно заблокировать работу усилителя мощности (снять внешний сигнал «Передача»), затем подключить к модулю аппаратуру МРК, подать от кнопки Кн2 сигнал «Стоп», по которому в ЗУ А6 записывается блок данных, показывающий величину смещения секундных импульсов от их положения по шкале времени.

Так же как и в модуле СИД–МГАС, запоминающие устройства А6 модулей СИД–ОИ и СИД–К являются энергонезависимыми, поэтому их считывание может осуществляться как в составе модулей, так и после извлечения ЗУ из модулей.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложено в качестве образцового генератора применить отечественную аппаратуру частотно-временной синхронизации МРК–23. Применение аппаратуры МРК позволяет организовать привязку составных частей аппаратуры

СИД к шкале единого времени посредством записи в память в моменты начала и окончания сеанса измерения 13-байтных блоков данных, содержащих информацию о величине смещения внутренней временной шкалы МРК относительно абсолютной временной шкалы, и использовании этой информации на этапе обработки данных измерений.

Предложены структурные схемы, входящие в состав аппаратуры СИД, это унифицированные модули СИД–МГАС, СИД–ОИ, СИД–К. Для реализации указанных модулей рекомендовано использовать приемопередатчик сигналов СИД.

С целью повышения эффективности использования запоминающего устройства записываемые в него данные подвергаются сжатию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 78–84.

2. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel / K.G. Kekal, V.K. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Petroccia // Gyroscopy Andnavigation. – 2016. – Vol. 7, N 4. – P. 343–352.

3. *Филиппов Б.И., Малахова Е.А.* Принципы построения систем гидроакустической связи // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 4 (62). – С. 33–40.

4. *Филиппов Б.И.* Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 3. – С. 81–91.

5. *Филиппов Б.И.* Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 55. – С. 33–40.

6. *Филиппов Б.И.* Алгоритм функционирования системы измерения дистанции с использованием гидроакустического канала связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 4. – С. 87–98.

7. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Принципы аппаратурной реализации системы измерения дальности в гидроакустических каналах // Радиотехника. – 2017. – № 3. – С. 40–49.

8. Патент 2289149 Российская Федерация. Гидроакустическая синхронная дальномерная навигационная система дальнего действия / Б.А. Касаткин. – Заявл. 21.12.2004; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

9. Патент 2248586 Российская Федерация. Способ определения дистанции в гидроакустической сети / Г.И. Криволапов, Т.Г. Криволапов, А.Е. Малащенко. – Заявл. 01.07.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. № 8.

10. Патент 2313802 Российская Федерация. Способ измерения расстояния до контролируемого объекта / Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин. – Заявл. 14.08.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.

11. Патент 2313803 Российская Федерация. Способ измерения расстояния до контролируемого объекта / Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин. – Заявл. 16.08.06; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.

12. *Филиппов Б.И., Емельянова И.А.* Метод измерения дистанции в гидроакустическом измерительном комплексе // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2017. – № 3 (35). – С. 6–19.

13. *Филиппов Б.И., Труш Т.Б.* Оценка погрешности измерения длительности распространения сигнала в гидроакустическом канале на основе привязки к шкале единого времени // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 4 (62). – С. 41–50.

14. Аппаратура МРК-23: технические условия ТУ УЭ2.517.012.

15. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления в гидроакустических каналах связи // Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 3 (161). – С. 69–72. – (Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь; вып. 11).

16. *Филиппов Б.И.* Протокол обмена сигналами в сети гидроакустических донных автономных станций // Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 11 (176). – С. 104–111. – (Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь; вып. 12).

**Филиппов Борис Иванович**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – радиотехника и связь, теория надежности сложных систем. Опубликовано 45 статей, два учебных пособия и монография. E-mail: filippov-boris@mail.ru

**Кожяева Анна Олеговна**, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: Anya.Kozhaeva@yandex.ru

## Development of the structural scheme of the remote measurement equipment in the hydroacoustic channel\*

**B.I. Filippov<sup>1</sup>, A.O. Kozhaeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, associate professor, Candidate of Technical Sciences E-mail: filippov-boris@rambler.ru*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the information security department E-mail: Anya.Kozhaeva@yandex.ru*

The object of the study are the measuring systems the distance between objects separated by an aqueous medium. The purpose of the work is the development of the equipment for determining the time of propagation of acoustic signals between objects in water based on the binding of "clocks" installed on the objects to a common time scale. Determination of the distance  $D$  from a dimension object (DM) to the multifunctional hydroacoustic station (MHAS) as part of the operational hydroacoustic measuring complex (OHMC) can be performed using the calculation method based on the measurement of propagation time  $\tau$  of the acoustic signal between the DO and the MHAS. To measure the propagation time of the acoustic signal from the DO to the MHAS, the mutually synchronized clock is placed at the DO and the MHAS. The transmission time  $t_i$  is counted according to the DO clock. The signal  $S(t)$ , distributing in space, reaches the station's location point. The MHAS receives the signal, the detection time  $t_j$  of this signal is fixed in accordance with the station's clock. The propagation time  $\Delta\tau$  of the acoustic signal between the DO and the MHAS is determined by the station clock information about the transmission times from the DO to the MHAS. It is suggested to use Small Missile Ship – 23 (SMShip-23) the domestic equipment for time-frequency synchronization as a model generator. The use of SMShip equipment allows to refer the components of the LED equipment to the scale of the common time by recording the time of the start and the end of the measurement session by means of 13-byte data blocks, containing information about the offset magnitude of the internal time scale of the SMShip relatively to the absolute time scale, and the use of this information at the stage of processing the measurement data. Further on one can find the structural diagrams of the LED instrument components into the suggested includes modules of LED-MHAS, LED-DO, LED-K.

**Keywords:** hydroacoustic channel, range measurements system, transmission and reception of hydroacoustic signal, a dimension object (DO), the multifunctional hydroacoustic station (MHAS), the operational hydroacoustic measuring complex (OHMC), a common time scale, time-frequency synchronization

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-33-48

---

\* Received 06 October 2017.

## REFERENCES

1. Filippov B.I., Cherneckiy G.A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Analysis of statistical characteristics of signals and noises in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 3, pp. 78–84.
2. Kekal K.G., Kebkal V.K., Kebkal A.G., Petroccia R. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 343–352.
3. Filippov B.I., Malakhova E.A. Printsipy postroeniya sistem gidroakusticheskoi svyazi [Principles of hydroacoustic communication systems creation]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2017, no. 4 (62), pp. 33–40.
4. Filippov B.I. Energeticheskii raschet gidroakusticheskikh linii svyazi [Energy calculation of hydroacoustic communication lines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 81–91.
5. Filippov B.I. Opredelenie naklonnoi dal'nosti mezhdru sudnom i donnoi stantsiei [Determination of the inclined range between the vessel and the bottom station]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2016, no. 55, pp. 33–40.
6. Filippov B.I. Algoritm funktsionirovaniya sistemy izmereniya distantsii s ispol'zovaniem gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithm for the functioning of a distance measuring system using a hydroacoustic communication channel]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 4, pp. 87–98.
7. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Printsipy apparaturnoi realizatsii sistemy izmereniya dal'nosti v gidroakusticheskikh kanalakh [Principles of hardware implementation measurement system range in the hydroacoustic channel]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2017, no. 3, pp. 40–49.

8. Kasatkin B.A. *Gidroakusticheskaya sinkhronnaya dal'nomernaya navigatsionnaya sistema dal'nego deistviya* [Hydroacoustic synchronous long-range distance measuring navigation system]. Patent RF, no. 2289149, 2006.
9. Krivolapov G.I., Krivolapov T.G., Malashenko A.E. *Sposob opredeleniya distantsii v gidroakusticheskoi seti* [Method for determination of distance in hydroacoustic network]. Patent RF, no. 2248586, 2005.
10. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. *Sposob izmereniya rasstoyaniya do kontrolirovannogo ob"ekta* [Mode of measuring distance to a controlled object]. Patent RF, no. 2313802, 2007.
11. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. *Sposob izmereniya rasstoyaniya do kontrolirovannogo ob"ekta* [Mode of measuring distance to a controlled object]. Patent RF, no. 2313803, 2007.
12. Filippov B.I., Emel'yanova I.A. Metod izmereniya distantsii v gidroakusticheskom izmeritel'nom komplekse [Method for measuring the distance in a hydroacoustic measuring system]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy – Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2017, no. 3 (35), pp. 6–19.
13. Filippov B.I., Trush T.B. Otsenka pogreshnosti izmereniya dlitel'nosti rasprostraneniya signala v gidroakusticheskom kanale na osnove privyazki k shkale edinogo vremeni [Method to measure signal distribution duration in hydroacoustic channel based on messages to single time scale]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2017, no. 4 (62), pp. 41–50.
14. *The equipment of MRK-23*. Technical conditions TU UE2.517.012 (In Russian).
15. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Vybór ansamblya signalov dlya peredachi komand upravleniya v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Choice of ensemble of signals for transfer of teams management in the hydroacoustic communication channels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 3 (161), pp. 69–72.
16. Filippov B.I. Protokol obmena signalami v seti gidroakusticheskikh donnykh avtonomnykh stantsii [The protocol of an exchange of signals in a network of hydroacoustic ground autonomous stations]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 11 (176), pp. 104–111.

Для цитирования:

Филиппов Б.И., Кожяева А.О. Разработка структурной схемы аппаратуры измерения дистанции в гидроакустическом канале // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 33–48.

For citation:

Filippov B.I., Kozhaeva A.O. Razrabotka strukturnoi skhemy apparatury izmereniya distantsii v gidroakusticheskom kanale [Development of the structural scheme of the remote measurement equipment in the hydroacoustic channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 33–48.



*СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ*

УДК 004.852:004.023:519.24:006.72

**ПРИМЕР СЛОЖЕНИЯ ЧИСЕЛ  
В БИНАРНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ\***

Н.О. ИВАНОВ<sup>1</sup>, Д.О. ТИНГАЙКИН<sup>2</sup>, В.В. КОМИССАРОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматики. E-mail: stenrulf@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматики. E-mail: teenguyking@gmail.com

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматики. E-mail: sodiz@yandex.ru

В статье рассматривается пример решения задачи сложения чисел в двоичном представлении при помощи нейросети. Рассматриваемая задача является задачей классификации. Она решается при помощи многослойного персептрона. Задача классификации имеет множество объектов (ситуаций), разделенных некоторым образом на классы. Задано конечное множество объектов, для которых известно, к каким классам они относятся. Это множество называется обучающей выборкой. Классовая принадлежность остальных объектов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества. Искусственная нейронная сеть – это математическая модель в совокупности с программной или машинной реализацией, построенная подобно биологическим нейронным сетям и сетям нервных клеток биологических живых организмов. Нейронные сети не могут быть «запрограммированы» в общепринятом понимании этого слова, но они способны обучаться. Возможность обучения – важнейшее преимущество нейронных сетей перед классическими алгоритмами. Обучение нейросети – это процесс, заключающийся в поиске необходимых коэффициентов связей между нейронами. При обучении нейронной сети используются методы оптимизации. В данном случае целью оптимизации будет минимизация ошибки. Метод наименьших квадратов – математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных. МНК является одним из базовых методов регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.

---

\* Статья получена 18 сентября 2017 г.

**Ключевые слова:** метод обратного распространения ошибки, градиентный спуск, нейронная сеть, многослойный персептрон, сумматор, метод наименьших квадратов, топология нейронной сети, машинное обучение

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-49-64

## ВВЕДЕНИЕ

Все задачи, которые способны решать нейронные сети, связаны с обучением. Основные области применения нейронных сетей: прогнозирование, принятие решений, распознавание образов, анализ данных.

Пару десятков лет назад скорость работы нейронных сетей была слишком медленной, для того чтобы они могли использоваться в производстве, и поэтому подобные системы, как правило, использовались в проектах, связанных с компьютерным зрением, а в остальных областях применялись менее затратные алгоритмы машинного обучения.

Сложным и длительным процессом разработки нейронной сети является обучение. Для того чтобы нейронная сеть могла корректно решать поставленные задачи, необходимо провести подготовку в виде анализа выборки большого количества входных данных с заранее известными правильными или неправильными ответами. Появление разнообразных технологий ускоренного обучения дало толчок к распространению нейронных сетей.

Для обучения нами будет использоваться алгоритм нахождения локального экстремума функции с помощью движения вдоль градиента, относящийся к локальной оптимизации. Это метод градиентного спуска. Метод градиентного спуска наиболее простой в реализации из всех методов локальной оптимизации. Имеет довольно слабые условия сходимости, но зато обладает сложностью сходимости  $O(n)$ , что очень важно для вычислительных машин. На методе градиентного спуска базируется метод обратного распространения ошибки. Этот метод обучения многослойного персептрона предполагает два прохода по всем слоям сети: прямой и обратный. В случае прямого прохода вектор входных данных поступает на входной слой нейронной сети, а затем передается по сети по каждому слою. В итоге создается набор выходных импульсов, являющийся реакцией на входные импульсы. Прямой проход не затрагивает синаптические веса сети, т. е. они являются константными. А обратный проход, напротив, изменяет синаптические веса согласно правилу коррекции ошибок: полученные результаты сети вычитаются из ожидаемых, в результате генерируется ошибка. Затем ошибка распространяется по сети в обратном направлении синаптических связей. Синаптические веса подбираются с целью максимального приближения выходного сигнала сети к ожидаемому.

Основной проблемой реализации функции на основе нейронов является подбор такой нелинейности, которая подходит под заданный критерий точности (например, при заявленной ошибке в 20 %; далее будет использоваться абсолютное значение 0,2).

## 1. ОПИСАНИЕ

Нейронные сети используются в решении различных задач [1–4, 12, 13]. В данной работе будет решаться задача классификации.

В процессе решения задач классификации с помощью многослойного перцептрона возникает ряд классических проблем [5]. Это происходит из-за неоднозначности выбора параметров системы. Для решения этих проблем существуют разные подходы [4].

Далее мы будем рассматривать сложение чисел с помощью многослойного перцептрона, выполняющего функцию сумматора. Для этого мы будем работать с числами в бинарном представлении.

Рассмотрим сумматоры для одно-, двух- и трехбитовых чисел и попробуем вывести закономерность в построении топологии для возможности расширения системы.

### Градиентный спуск

Основная идея метода градиентного спуска [9–11] заключается в том, чтобы осуществлять оптимизацию в направлении наискорейшего спуска. Направление задается антиградиентом  $-\nabla f$ .

Алгоритм принимает на вход функцию от вектора действительных аргументов  $f: R^n \rightarrow R$ . В результате работы алгоритма вычисляется точка оптимума.

На каждом шаге алгоритма вычисляется значение, такое что

$$x^{k+1} = x^k - \lambda^k \nabla f(x^k),$$

$\lambda^k$  выбирается:

- постоянной, в этом случае метод может расходиться;
- дробным шагом, т. е. длина шага в процессе спуска делится на некое число;

• наискорейшим спуском:  $\lambda^{[k]} = \arg \min(f(x^{[k]} - \lambda \nabla f(x^{[k]}))_{\lambda}$ .

Критерий останова выбирается одним из следующих способов:

1)  $\|x^{[k+1]} - x^{[k]}\| \leq \varepsilon$ ;

$$2) \|f(x^{[k+1]}) - f(x^{[k]})\| \leq \varepsilon.$$

Здесь  $x^{[k]} \in R^n$  – значение, полученное после  $k$ -го шага оптимизации;  $\varepsilon$  – наперед заданное положительное число.

### Метод обратного распространения ошибки

Суть этого метода состоит в распространении сигналов ошибки [7, 8] от выходов сети к ее входам в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы.

Алгоритм

1. Инициализировать  $\{w_{ij}\}_{i,j}$  малыми случайными значениями.
2. Для всех  $d$  от 1 до  $m$ :
  - а) подать  $\{x_i^d\}$  на вход сети и подсчитать выходы  $O_i$  каждого узла;
  - б) для всех  $k$  выполнить  $k \in Outputs$ ;
  - в) выполнить вычисления  $\delta_k = o_k(1 - o_k)(t_k - o_k)$ .
3. Повторить  $N$  раз действия п. 2.
4. Для каждого уровня, начиная с предпоследнего:
  - а) для каждого узла  $j$  уровня вычислить

$$\delta_k = o_k(1 - o_k) \sum \delta_k w_{jk}, k \in Children(j);$$

- б) для каждого ребра сети  $\{i, j\}$  вычислить

$$w_{i,j} = w_{i,j} + \eta \delta_j x_{i,j}.$$

5. Выдать значения  $w_{ij}$ .

### Активационная функция

В качестве активационной функции используется сигмоидальная (рис. 1):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}}, \quad \alpha = 1.$$

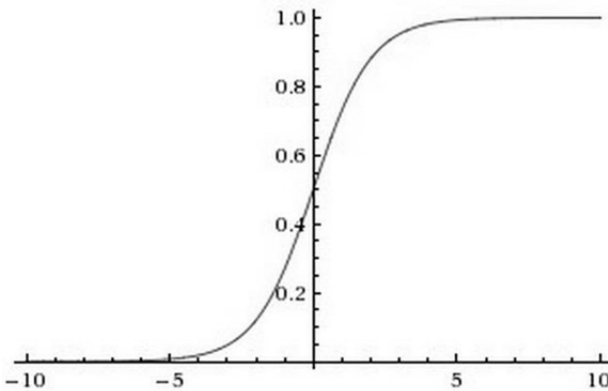


Рис. 1. Логистическая функция (сигмоида)

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

- На основе многослойного персептрона Розенблатта, использующего для обучения метод обратного распространения ошибки, реализовать сумматор трехбитовых чисел в бинарном представлении.
- Рассмотреть различные варианты решения данной задачи.

## 3. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Нейроны обучаемой сети используют сигмоидальную функцию активации. Обучение выполняется при помощи самописной программы на языке C++. Начальные условия задаются равномерным распределением из диапазона  $\{-0.1, 0.1\}$ , непосредственно само обучение выполняется за 5000 эпох с использованием метода обратного распространения ошибки.

Кроме того, рассматривался пример сложения двух чисел, представленных в бинарном виде тремя разрядами.

Далее в статье будем руководствоваться обозначениями:

$a_0 a_1 \dots a_{n-1} a_n$ , где  $a_i$  –  $i$ -й бит первого числа;

$b_0 b_1 \dots b_{n-1} b_n$ , где  $b_i$  –  $i$ -й бит второго числа.

### Однобитный сумматор

Набор возможных комбинаций при сложении двух битовых чисел выглядит следующим образом:

Операция суммирования может быть представлена через элементарные логические операции.

Как видно из таблицы, первый бит можно получить из входных значений посредством операции «исключающее ИЛИ»:

$$XOR \Leftrightarrow (a_0 \wedge \neg b_0) \vee (\neg a_0 \wedge b_0).$$

Второй бит можно получить из входных значений посредством операции «логическое И».

**Таблица истинности для однобитного сложения**

Первое слагаемое	Второе слагаемое	Сумма		
		Десятичное представление	Двоичное представление	
			Первый бит	Второй бит
0	0	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	2	1	0

Операция «И» может быть выполнена на однослойном персептроне с двумя входами и одним выходом [1–3], однако операция «исключающее ИЛИ» является классической задачей, которая не может быть решена на однослойном персептроне. Впрочем, она может быть решена на двухслойном персептроне [4]. Следовательно, нам потребуется сеть с одним скрытым слоем, содержащим два нейрона.

Расчет коэффициентов был произведен с использованием метода обратного распространения ошибки программой, написанной на языке C++.

Решение имеет неоднозначность, так как коэффициенты для решения этой задачи могут быть подобраны различным образом [3].

### Двухбитное сложение

По аналогии с однобитовым сложением мы вывели формулы для каждого из битов при сложении трехбитовых чисел.

Так же как и в примере с однобитовым сумматором (рис. 2), попытаемся спрогнозировать топологию двухбитового сумматора исходя из логических формул для каждого бита.

Первый бит:  $(a_0 \wedge a_1 \wedge b_1) \vee (a_0 \wedge b_0) \vee (a_1 \wedge b_0 \wedge b_1)$ .

Второй бит:  $(a_0 \wedge a_1 \wedge b_0 \wedge b_1) \vee (a_0 \wedge \neg a_1 \wedge \neg b_0) \vee$   
 $\vee (a_0 \wedge \neg b_0 \wedge \neg b_1) \vee (\neg a_0 \wedge a_1 \wedge \neg b_0 \wedge b_1) \vee$   
 $\vee (\neg a_0 \wedge \neg b_0 \wedge b_0) \vee (\neg a_0 \wedge b_0 \wedge \neg b_1)$ .

Третий бит:  $(a_1 \wedge \neg b_1) \vee (\neg a_1 \wedge b_1)$ .

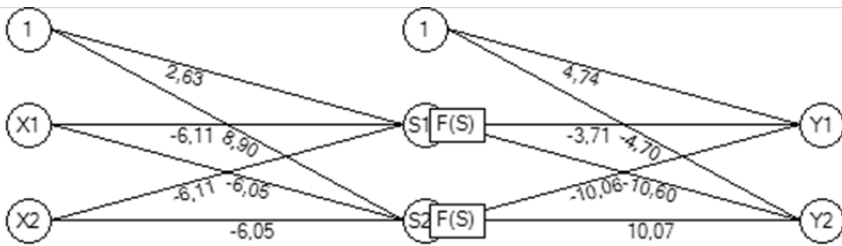


Рис. 2. Однобитный сумматор

По логическим формулам первого бита спроектируем часть топологии (рис. 3).

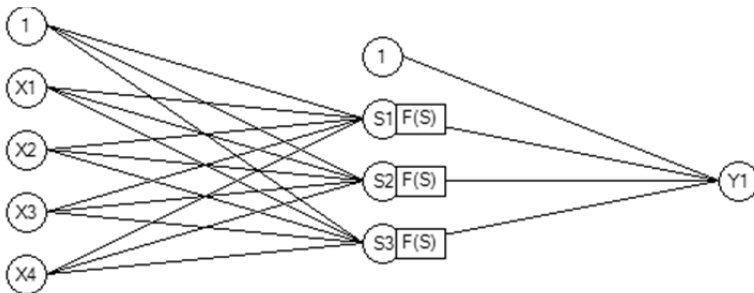


Рис. 3. Топология для первого бита

Часть сети для первого бита имеет три нейрона в скрытом слое. Логическая формула для первого бита самая короткая. Очевидно, что сеть, спроектированная исходя из логических формул, будет избыточной.

Поэтому эвристическим путем было выяснено, что наиболее стабильной сетью с разумным количеством нейронов является сеть с четырьмя нейронами в скрытом слое (рис. 4).

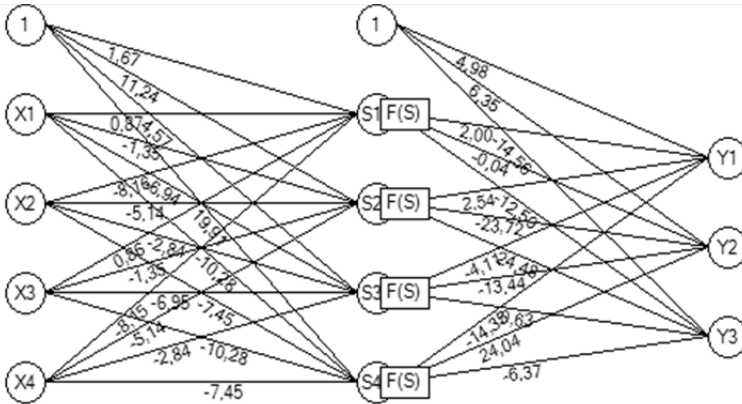


Рис. 4. Двухбитный сумматор

### Трехбитное сложение

Для трехбитного сумматора вывести логические формулы достаточно затруднительно, поэтому мы решили выполнить тестирование различных топологий.

Мы провели 100 экспериментов для каждой из рассмотренных топологий и вывели функцию ошибки по методу наименьших квадратов, а также разницы между ожидаемым и полученным ответом. Сети обучались 5000 эпох.

$$error_i = \frac{\sum_{k=0}^{exper} \sum_{j=0}^{iter} (derror_{i,j,k})^2}{2 * exper},$$

где  $derrors$  – вектор ошибок на выходном слое,  $exper$  – число экспериментов,  $iter$  – число итераций на каждой эпохе,  $error_i$  – ошибка в  $i$ -й эпохе (средняя по экспериментам).



Как можно заметить по графику (рис. 6), после 1000 *epoch* скорость уменьшения ошибки резко снижается, и на 5000 *epoch* нейросеть (рис. 5) не сходится, имея ошибку  $\sim 0,2$ .

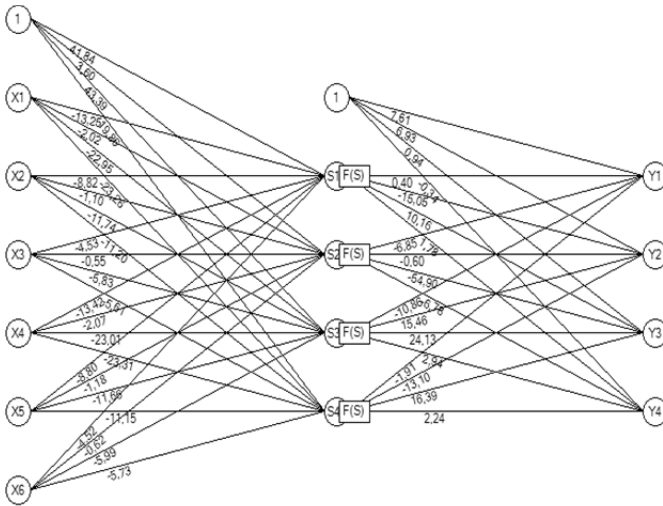


Рис. 5. Трехбитный сумматор. Четыре нейрона в скрытом слое

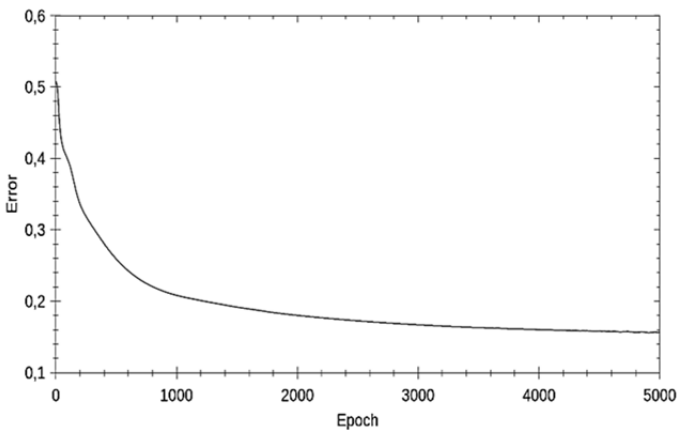


Рис. 6. График ошибки, полученной по МНК, для нейросети с четырьмя нейронами в скрытом слое

По графику (рис. 8) видно, что сеть (рис. 7) с данной топологией имеет меньшую ошибку, однако имеет проблемы со сходимостью, как и предыдущая (рис. 5).

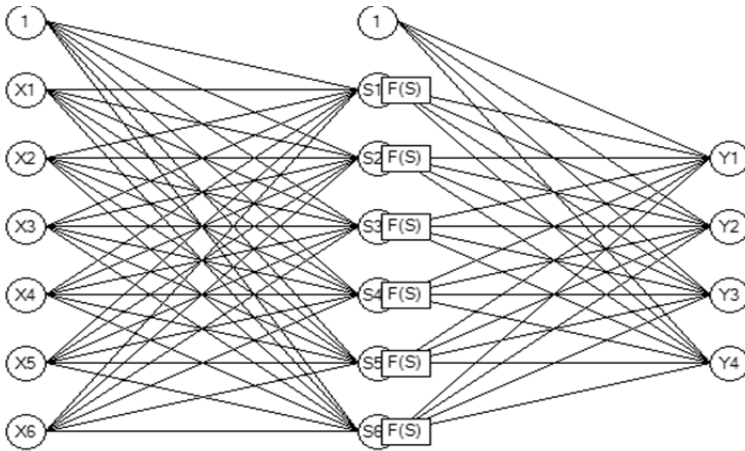


Рис. 7. Трехбитный сумматор. Шесть нейронов в скрытом слое

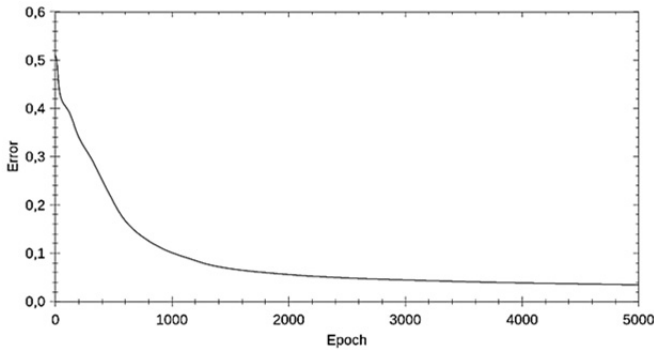


Рис. 8. График ошибки, полученной по МНК, для нейросети с шестью нейронами в скрытом слое

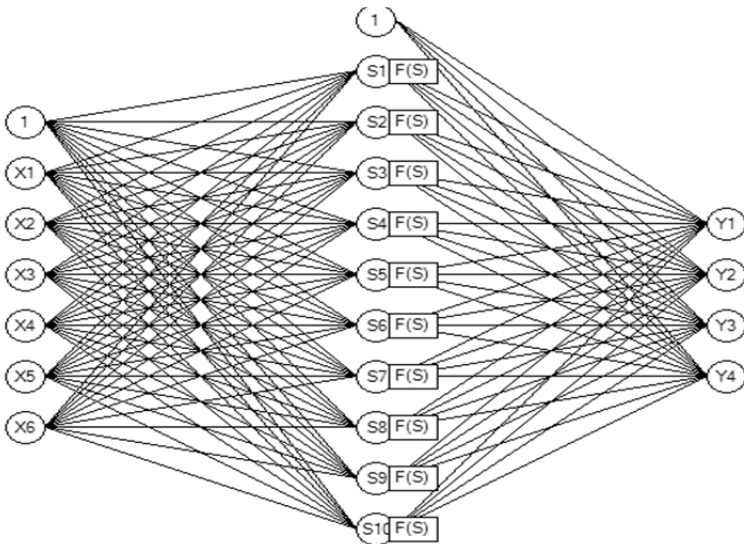


Рис. 9. Трехбитный сумматор. Десять нейронов в скрытом слое

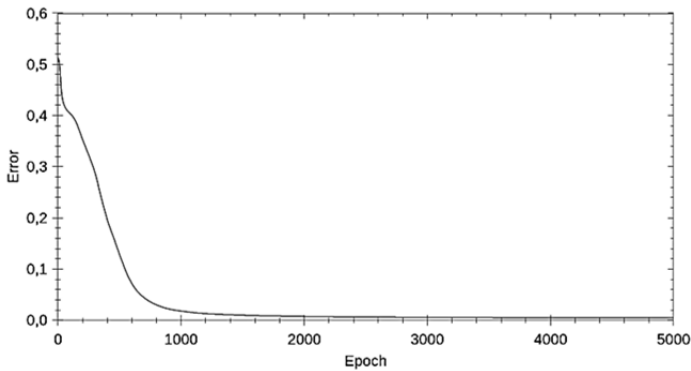


Рис. 10. График ошибки, полученной по МНК, для нейросети с десятью нейронами в скрытом слое.

По графику (рис. 10) видно, что сеть (рис. 9) с данной топологией имеет сходимость на 1000 *epoch*.

Аналогичные эксперименты были проведены на сетях, содержащих от 1 до 12 нейронов скрытом слое. Было получено значение доли правильных от-

ветов в зависимости от числа нейронов в скрытом слое. Результаты экспериментов представлены на графике (рис. 11).

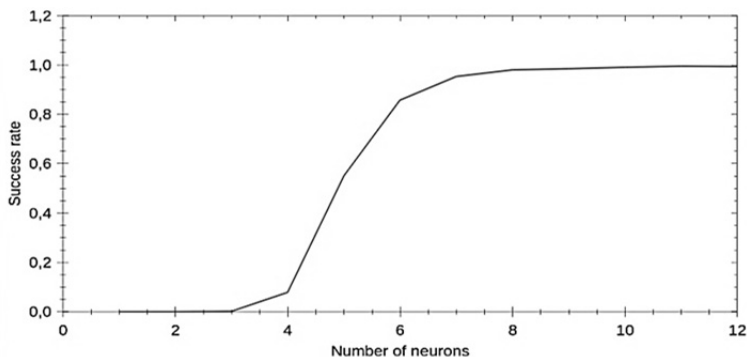


Рис. 11. Зависимость успеха обучения от числа в скрытом слое

Из графика (рис. 11) видно, что для реализации трехбитного сумматора на классическом многослойном персептроне необходимо использовать количество нейронов в скрытом слое  $\geq 8$ .

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору кафедры автоматики А.А. Воеводе за помощь при выполнении работ, а также полезное обсуждение полученных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что прогнозирование сети исходя из логических формул для каждого бита результата сложения является нетривиальной задачей. Если подходить непосредственно к реализации, то количество нейронов при проектировании сети будет значительно больше, чем число нейронов, полученных при классическом способе обучения с помощью метода обратного распространения ошибки и метода градиентного спуска.

Для трехбитного сумматора были рассмотрены топологии многослойного персептрона с одним скрытым слоем и различным числом нейронов в нем. По результатам экспериментов сделан вывод о том, что минимальной надежной топологией является топология с восемью нейронами в скрытом слое.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Розенблатт Ф.* Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
2. *Минский М., Пейперт С.* Перцептроны. – М.: Мир, 1971. – 261 с.
3. *Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.* Learning internal representations by error propagation // *Parallel Distributed Processing.* – Cambridge, MA: MIT Press, 1986. – Vol. 1. – P. 318–362.
4. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для решения логико-арифметических задач // *Труды СПИИРАН.* – 2017. – Вып. 5 (54). – 205–223.
5. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
6. *Горбань А.Н., Россиев Д.А.* Нейронные сети на персональном компьютере. – Новосибирск: Наука, 1996. – 276 с. – ISBN 5-02-031196-0.
7. *Wasserman P.D.* Experiments in translating Chinese characters using back-propagation // *Proceedings of the Thirty-Third IEEE Computer Society International Conference.* – Washington, D.C.: Computer Society Press of the IEEE, 1988. – P. 399–402.
8. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
9. *Максимов Ю.А., Филлиповская Е.А.* Алгоритмы решения задач нелинейного программирования. – М.: МИФИ, 1982. – 52 с.
10. *Максимов Ю.А.* Алгоритмы линейного и дискретного программирования. – М.: МИФИ, 1980. – 72 с.
11. *Городецкий С.Ю., Гришагин В.А.* Нелинейное программирование и многоэкстремальная оптимизация. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 2007. – С. 357–363.
12. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Асинхронный алгоритм сортировки массива чисел с использованием ингибиторных сетей Петри // *Труды СПИИРАН.* – 2016. – № 5 (28). – С. 198–213.
13. *Воевода А.А., Полубинский В.Л., Романников Д.О.* Сортировка массива целых чисел с использованием нейронной сети // *Научный вестник НГТУ.* – 2016. – № 2 (63). – С. 151–157.

**Иванов Никита Олегович**, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета по направлению «Информатика и вычислительная техника». E-mail: [stenrulf@gmail.com](mailto:stenrulf@gmail.com)

**Тингайкин Денис Олегович**, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета по направлению «Информатика и вычислительная техника». E-mail: teenguyking@gmail.com

**Комиссаров Валерий Владимирович**, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета по направлению «Информатика и вычислительная техника». E-mail: sodiz@yandex.ru

## Example of adding numbers in a binary representation using neural networks\*

**N.O. Ivanov<sup>1</sup>, D.O. Tingajkin<sup>2</sup>, V.V. Komissarov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: stenrulf@gmail.com*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: teenguyking@gmail.com*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: sodiz@yandex.ru*

The article considers an example of solving the problem of adding numbers in a binary representation using a neural network. The problem under consideration is a classification problem. It is solved by means of a multilayer perceptron. The classification problem has many objects (situations), divided in some way into classes. A finite set of objects is defined for which it is known which classes they belong to. This set is called a training sample. The class affiliation of the remaining objects is not known. It is required to construct an algorithm capable of classifying an arbitrary object from the original set. An artificial neural network is a mathematical model in conjunction with a software or machine implementation, built like biological neural networks, nerve cell networks of biological living organisms. Neural networks can not be "programmed" in the conventional sense of the word, but they are able to train. The possibility of training the most important advantage of neural networks over the "classical" algorithms. Training a neural network is a process that involves finding the necessary coefficients of connections between neurons. When training a neural network, optimization methods are used. In this case, the optimization goal will be to minimize the error. The method of least squares is a mathematical method used to solve various problems, based on minimizing the sum of squares of deviations of certain functions from the unknown variables. OLS is one of the basic methods of regression analysis for estimating unknown parameters of regression models from sample data.

**Keywords:** backpropagation, gradient descent, optimization methods, multilayer perceptron, adder, the method of least squares, neural network topology, machine training

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-49-64

---

\* Received 18 September 2017.

## REFERENCES

1. Rosenblatt F. *Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Washington, Spartan Books, 1962 (Russ. ed.: Rozenblatt F. *Printsiipy neirodinamiki: pertseptrony i teoriya mekhanizmov mozga*. Moscow, Mir Publ., 1965. 480 p.).
2. Minsky M., Papert S. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*. Cambridge, MA, London, MIT Press, 1969 (Russ. ed.: Minskii M., Peipert S. *Perseptrony*. Moscow, Mir Publ., 1971. 261 p.).
3. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning internal representations by error propagation. *Parallel Distributed Processing*. Cambridge, MA, MIT Press, 1986, vol. 1, pp. 318–362.
4. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Sintez neironnoi seti dlya resheniya logiko-arifmeticheskikh zadach [Synthesis of neural network for solving logical-arithmetic problems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2017, iss. 5 (54), pp. 205–223.
5. Haykin S. *Neural networks*. Upple Saddle River, Prentice Hall, 1999 (Russ. ed.: Khaikin S. *Neironnye seti. Polnyi kurs*. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p.).
6. Gorban' A.N., Rossiev D.A. *Neironnye seti na personal'nom komp'yutere* [Neural networks on a personal computer]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 276 p.— ISBN 5-02-031196-0.
7. Wasserman P.D. Experiments in translating Chinese characters using back-propagation. *Proceedings of the Thirty-Third IEEE Computer Society International Conference*. Washington, D.C., Computer Society Press of the IEEE, 1988, pp. 399–402.
8. Gill P.E., Murray W., Wright M.H. *Practical optimization*. London, New York, Academic Press, 1981 (Russ. ed.: Gill F., Myurrei U., Rait M. *Prakticheskaya optimizatsiya*. Moscow, Mir Publ., 1985. 509 p.).
9. Maksimov Yu.A., Fillipovskaya E.A. *Algoritmy resheniya zadach nelineinogo programmirovaniya* [Algorithms for solving nonlinear programming problems]. Moscow, MEPI Publ., 1982. 52 p.
10. Maksimov Yu.A. *Algoritmy lineinogo i diskretnogo programmirovaniya* [Algorithms of linear and discrete programming]. Moscow, MEPI Publ., 1980. 72 p.
11. Gorodetskii S.Yu., Grishagin V.A. *Nelineinoe programmirovanie i mnogoekstremal'naya optimizatsiya* [Nonlinear programming and multi-extremal optimization]. Nizhnii Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ., 2007, pp. 357–363.

12. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Asinkhronnyi algoritm sortirovki massiva chisel s ispol'zovaniem ingibitornykh setei Petri [Asynchronous sorting algorithm for array of numbers with the use of inhibitory Petri nets]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 3 (34), pp. 218–232.

13. Voevoda A.A., Polubinskii V.L., Romannikov D.O. Sortirovka massiva tsel'nykh chisel s ispol'zovaniem neironnoi seti [Sorting the array of integers using a neural network]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 151–157.

Для цитирования:

Иванов Н.О., Тингайкин Д.О., Комиссаров В.В. Пример сложения чисел в бинарном представлении с использованием нейронной сети // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 49–64.

For citation:

Ivanov N.O., Tingajkin D.O., Komissarov V.V. Primer slozheniya chisel v binarnom predstavlenii s ispol'zovaniem neironnoi seti [Example of adding numbers in a binary representation using neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 49–64.



УДК 519.688

## АНАЛИЗ ЗВУКОВОГО СПЕКТРА ГОЛОСОВЫХ КОМАНД С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ\*

К.А. ЧЕРДАНЦЕВ<sup>1</sup>, А.В. КЛАДЬКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент факультета автоматики и вычислительной техники. E-mail: medmene@yandex.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент факультета автоматики и вычислительной техники. E-mail: tonkladko@ya.ru

Задача анализа голоса стала востребованной с широким распространением компьютеров и их периферии. Сама по себе задача анализа речи человека позволяет открыть новые области статистики, психологии и т. д., в которых с помощью машинных вычислений можно анализировать речь реальных людей в таких объемах, в которых это неподвластно обычному человеку или даже группам людей. Слово или фраза, сказанные человеком в реальности, в компьютерном представлении описываются огромным числом параметров, и поэтому только с недавнего времени вычислительные мощности компьютеров позволяют в реальном времени обрабатывать видео- и аудиофайлы. В связи с этим стали появляться такие системы, как «умный дом», в основе которых заложено значительное упрощение взаимодействия машины и человека. В данной системе основным органом управления являются голосовые или даже звуковые команды человека, будь то слово или хлопок. Помимо этой системы широко используется анализ голоса в сети Интернет, где при поиске разного рода информации можно использовать голосовой поиск, к примеру, в случаях когда нет возможности набрать текстовый запрос, и это очень удобно, особенно в эру смартфонов. В будущем при технологиях очень развитого распознавания и анализа речи можно воспроизвести реальный механизм «общения» человека и машины, что позволит развивать и обучать машину как человека.

**Ключевые слова:** нейронные сети, алгоритмы, эксперимент, сортировка, многослойная нейронная сеть, однослойная нейронная сеть, числовые массивы, оценка алгоритмов, программирование

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-65-76

---

\* Статья получена 07 августа 2017 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для обработки голоса используются разные методы, а также кепстральный анализ, модели Маркова, ЦАП, АЦП и т. д. В нашей работе мы решили использовать для обработки голоса статистический механизм – нейронные сети. Чтобы отправить данные в нейронную сеть, нужно воспользоваться определенными методами, которые позволят как-то уменьшить количество амплитудных показателей исходного звукового сигнала. Обычно в этих случаях и используются методы, перечисленные выше. В нашей задаче для подготовки начальных данных было использовано два метода: кепстральный анализ и метод усреднения (математическое ожидание). После первичной обработки сигналы приводились в более удобный для нейронной сети вид, который позволяет не злоупотреблять количеством нейронов, чтобы не усложнять и не замедлять финальную обработку сигнала.

## **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для реализации распознавания и обработки голоса необходимо реализовать классы нейронов и нейронную сеть, отвечающие за конечный анализ и получение ответа, а также реализовать предварительную обработку данных в одном случае сведением всех данных к одной числовой константе, в другом – методом кепстрального анализа. Структуры сети будут различаться в зависимости от типа обработки данных.

## **2. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЯМОГО АНАЛИЗА**

Непосредственным или прямым анализом является второй метод. Суть его состоит в уменьшении количества амплитудных значений до фиксированного количества. Таким числом (далее – константа) было выбрано число 10 000, для того чтобы очень незначительно терялась точность обучения. Фактически мы подаем на вход чистые, необработанные данные.

Проект был разделен на следующие части:

- приведение данных к верхнему или нижнему пределу;
- усреднение данных до фиксированного числа;
- создание структуры нейронной сети.

### **Приведение данных к пределам**

Частота дискретизации звукового сигнала очень велика, и если полный звуковой сигнал подавать в нейронную сеть, то появляется две проблемы:

разные структуры сети для разных звуковых сигналов и большое количество нейронов, как следствие – большое время работы.

Чтобы справиться с проблемой разных структур сети, был разработан следующий алгоритм.

- Проверка на кратность константе. Случается очень редко и позволяет сразу перейти к следующему пункту.
- Отбрасывание лишних амплитудных значений. Количество начальных амплитудных значений округляется до кратности 100, значения убираются с конца.
- Проверяем остаток от деления на константу, меньше ли он 5000. Эта проверка позволяет определить несколько незначущих амплитудных значений (добавить их или отбросить).
- В случае остатка меньше 5000 убираем половину остатка с начала и с конца звукового сигнала.
- В противоположном случае вычисляем необходимое количество добавочных амплитудных значений по формуле  $a = 10\,000 - o$ , где  $a$  – количество амплитудных значений,  $o$  – остаток. Добавочные амплитудные значения распределяются поровну в начале и в конце звукового сигнала путем дублирования имеющихся амплитудных значений.
- После всех проведенных манипуляций получаем данные, кратные константе. Полученные данные используются в следующих пунктах.

### Усреднение данных

После первоначальной обработки количества амплитудных значений переходим непосредственно к изменению самой амплитуды. При прочтении *wav* файла мы получаем только положительные семплы, хотя в реальном звуковом сигнале они как положительные, так и отрицательные. Приводим семплы к их естественному виду по правилу: если семпл больше 32 768 ( $2^{15}$ ), то отнимаем от него 65 536 ( $2^{16}$ ). Это правило позволяет получить изначальный рисунок сигнала.

Следующим шагом приводим все амплитудные значения к константе. Для начала вычислим свертку путем деления количества амплитудных значений на константу. Далее каждые  $n$  амплитудных значений ( $n$  – число, соответствующее свертке) усредняются и помещаются во входной массив.

### Создание структуры нейронной сети

Нейронная сеть в данной реализации будет многослойной. Входной слой будет принимать значения, полученные после обработки. Первый и второй

слои скрытые, они и будут анализировать поступающие данные. В выходном слое будут находиться нейроны в количестве, равном количеству команд. Каждый из нейронов выходного слоя отвечает за свою команду.

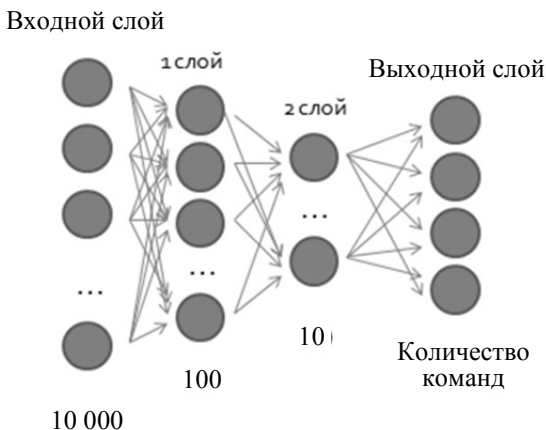


Рис. 1. Структура нейронной сети прямого анализа

### 3. РЕАЛИЗАЦИЯ КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Метод реализации с использованием кепстрального анализа является первым методом в рамках данной статьи. Его суть – в уменьшении количества входных амплитудных значений до фиксированного количества. Входные данные разделяются на фреймы – небольшие временные промежутки, для каждого фрейма производится кепстральный анализ, и полученные результаты передаются на вход нейронной сети.

Проект был разделен на следующие части:

- разделение исходных данных на фреймы;
- вычисление для каждого фрейма мел-частотных кепстральных коэффициентов;
- усреднение полученных коэффициентов между фреймами;
- создание структуры нейронной сети.

#### Разделение исходных данных на фреймы

В конкретной точке данные малоинформативны, звуковой сигнал гораздо информативнее, если рассматривать его на некотором промежутке – фрейме.

Исходные данные разделяются на фреймы, которые располагаются внахлест, что позволяет сгладить результаты анализа фреймов, превращая идею фреймов в некоторое «окно», движущееся вдоль значений сигнала.

### **Вычисление для каждого фрейма мел-частотных кепстральных коэффициентов**

Вычисления начинаются с умножения каждого фрейма на оконную функцию, что позволяет устранить разрывы на границах периодов, так как анализируемый сигнал не является периодическим. В качестве оконной функции мы выбрали функцию Хэмминга, которая плавно сводит на нет сигнал вблизи краев анализируемого участка. Далее выполняется быстрое преобразование сигнала Фурье.

На следующем этапе мы конвертируем частоты, полученные быстрым преобразованием Фурье в мел-частоты.

Затем мы выполняем расчет мел-фильтров, т. е. переходим к психофизической единице высоты звука, основанной на субъективном восприятии среднестатистическими людьми. Теперь нам нужно наложить полученную шкалу на спектр нашего фрейма и рассчитать искомые коэффициенты.

### **Усреднение полученных коэффициентов между фреймами**

Распознаваемое слово состоит из нескольких фреймов, для каждого из которых были рассчитаны мел-частотные кепстральные коэффициенты.

Среди всех фреймов, которые относятся к распознаваемому слову, находим итоговое значение коэффициентов – среднее значение среди всех соответствующих коэффициентов.

### **Создание структуры нейронной сети**

Нейронная сеть в данной реализации будет многослойной. Входной слой будет принимать значения, полученные после обработки. Первый слой – скрытый – будет анализировать поступающие данные. В выходном слое будут находиться нейроны в количестве, равном количеству команд. Каждый из нейронов выходного слоя отвечает за свою команду.

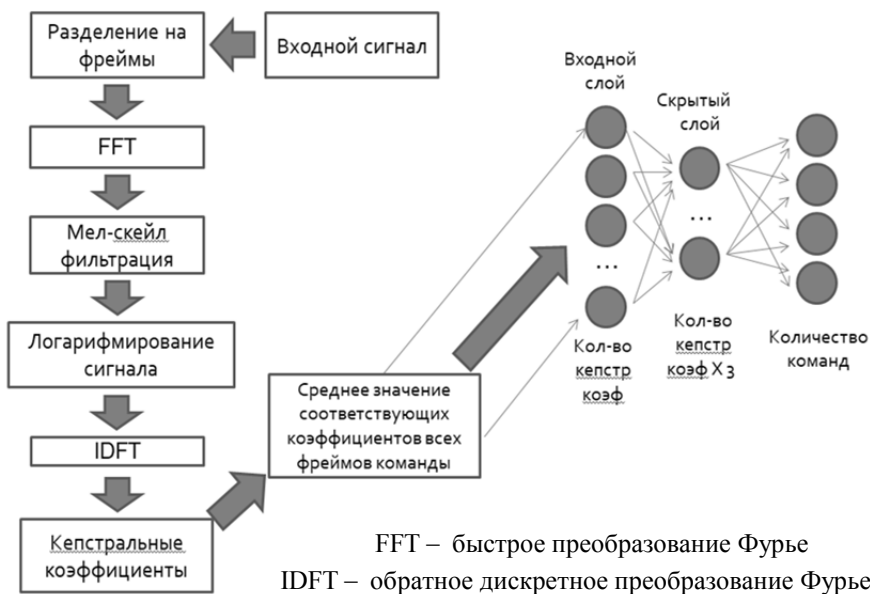


Рис. 2. Структура нейронной сети при кепстральном анализе

#### 4. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРЯМОГО АНАЛИЗА

В данной работе были получены две разные по структуре нейронные сети. У них была разная предварительная обработка данных, однако обучены они по одинаковому принципу, для того чтобы сравнить результаты обучения. Процесс обучения нейронной сети сводится к следующему: на вход подается обработанный голосовой сигнал, на выходном слое в том нейроне, к которому относится эта голосовая команда, стоит единица, на остальные нейроны подается ноль. Так как нейронную сеть можно обучить лишь пошагово (за один шаг один выход), то общий шаг обучения делится на подшаги в количестве нейронов выходного слоя. Обучение нейронной сети было проведено для трех выходных нейронов и соответственно трех голосовых команд. Алгоритм следующий.

- Выбирается количество эпох обучения. В нашем случае было выбрано 20.
- Загружаются сохраненные данные нейронной сети, если они есть.
- Нейронная сеть последовательно обучается каждому из трех слов и каждому из трех вариантов слов (сказанных разными людьми).

- Внутри функции обучения, где каждой голосовой команде соответствует выходной нейрон, вычисляется ошибка.
- После прохождения эпохи обучения (три слова, три вариации слова и три этапа в функции обучения) формируется ошибка сети за эпоху обучения.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видно из диаграммы (рис. 3), I подход позволяет создать НС, имеющую преимущество – меньшее итоговое значение ошибки.

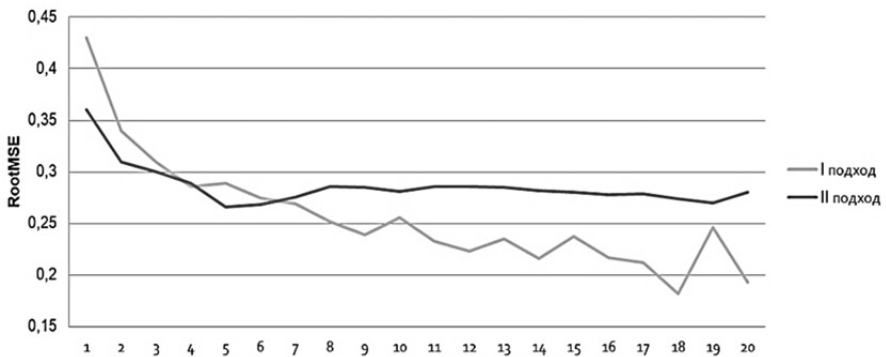


Рис. 3. Зависимость ошибки от количества пройденных эпох обучения

Преимуществом НС, реализованной II подходом, является значительно более высокая скорость обучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам этой работы видно, что ИНС не очень хорошо подходит для сортировки массива чисел. Это было заранее известно, так как сортировки обычно используют четкие, известные и явно реализуемые алгоритмы, которые дают точный результат. В случае с ИНС мы получаем массив, примерно сортированный по возрастанию с редкими значительными отклонениями от полностью отсортированного массива. Точность, достигнутая для данной ИНС, равна 4 % (40 ошибок из 1000 экспериментов) для однослойной ИНС за 24 часа непоследовательного обучения, для многослойной нейронной сети точность достигла 15 % (150 ошибок из 1000) за 2 часа последовательного обучения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою искреннюю благодарность профессору кафедры автоматике А.А. Воеводе и доценту кафедры вычислительной техники А.А. Малявко за помощь при выполнении работы, а также полезное обсуждение полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации / пер. с пол. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. *Галушкин А.И.* Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2010. – 496 с.
3. Модель бионической нейронной сети и ее применения [Электронный ресурс] / С.С. Ёлкин, С.В. Ёлкин, Э.С. Клышинский, В.Ю. Максимов, Т.Н. Мусаева. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008. – URL: [http://keldysh.ru/papers/2008/prev89/prev2008\\_89.html](http://keldysh.ru/papers/2008/prev89/prev2008_89.html) (дата обращения: 10.12.2017).
4. *Калан Р.* Основные концепции нейронных сетей. – М.: Вильямс, 2001. – 291 с.
5. *Воевода А.А., Марков А.В., Романников Д.О.* Разработка программного обеспечения: проектирование с использованием UML диаграмм и сетей Петри на примере АСУ ТП водонапорной станции // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3 (34). – С. 218–232.
6. *Марков А.В.* Свойства инверсии сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 139–152.
7. Al-Shayea Q.K. Artificial neural networks in medical diagnosis // International Journal of Computer Science Issues. – 2011. – Vol. 8, iss. 2. – P. 130–154.
8. *Capannini G., Silvestri F., Baraglia R.* Sorting on GPUs for large scale datasets: a thorough comparison // Information Processing and Management. – 2011. – Vol. 48 (5). – P. 903–917.
9. *Барский А.Б.* Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
10. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
11. *Медведев В.С., Потемкин В.Г.* Нейронные сети. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 496 с.
12. *Яхьяева Г.Э.* Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Бином, 2006. – 374 с.



13. *Комашинский В.И., Смирнов Д.А.* Нейронные сети и их применение в системах управления связи. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2003. – 94 с.
14. *Загуменнов А.В.* Компьютерная обработка звука. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 580 с.
15. *Лоянич А.Т.* Запись и обработка звука на компьютере. – М.: Эксмо, 2008. – 390 с. – (Просто как 2х2).
16. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Асинхронный алгоритм сортировки массива чисел с использованием ингибиторных сетей Петри // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 5 (28). – С. 198–213.
17. *Воевода А.А., Полубинский В.Л., Романников Д.О.* Сортировка массива целых чисел с использованием нейронной сети // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 2 (63). – С. 151–157.

**Черданцев Константин Артурович**, студент факультета автоматике и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Имеет одну публикацию. E-mail: medmene@yandex.ru.

**Кладько Антон Владимирович**, студент факультета автоматике и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. E-mail: tonkladko@ya.ru.

## **Analysis of the sound spectrum of voice commands with the neuron network\***

**К.А. Cherdantsev<sup>1</sup>, А.В. Kladko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: medmene@gmail.ru*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: tonkladko@ya.ru*

The task of voice analysis has become popular with the widespread use of computers and their peripherals. By itself, the task of analyzing human speech allows us to discover new areas of statistics, psychology, etc., in which, with the help of computer calculations, it is possible to analyze the speech of real people, in such volumes, in which it is not possible for an ordinary

---

\* Received 07 August 2017.

person or even groups of people. A word or phrase spoken by a person in reality, in computer representation is described by a huge number of parameters and therefore only recently computing power of computers allows real-time processing of video and audio files. In this connection, such systems as "smart house" began to appear, based on the considerable simplification of the interaction of the machine and the person. In this system, the main control is the voice or even the sound commands of a person, be it words or say cotton. In addition to this system, voice analysis on the Internet is widely used. There, when searching for various kinds of information, you can use voice search, for example, when there is no possibility to type a text request, and it is very convenient, especially in the era of smartphones. In the future, with the technologies of highly developed speech recognition and analysis, it is possible to reproduce the real mechanism of "communication" between a person and a machine, which will allow developing and training the machine as a human being.

**Keywords:** Neural networks, algorithms, experiment, neural networks, speech recognition, cepstral analysis, multilayer neural network, evaluation algorithms, programming

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-65-76

## REFERENCES

1. Osowski S. *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji* [Neural network for analysing information]. Warszawa, Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, 2000 (Russ. ed.: Osovskii S. Neironnyye seti dlya obrabotki informatsii. Translated from Polish. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p.).
2. Galushkin A.E. *Neironnyye seti: osnovy teorii* [Neural network. Base theory]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2010. 496 p.
3. Yolkin S.S., Yolkin S.V., Klishinskiy E.S., Maksimov V.Y., Musaeva T.N. *Model' bionicheskoi neironnoi seti i ee primeneniya* [The bionic neural network model and its applications]. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 2008. Available at: [http://keldysh.ru/papers/2008/prep89/prep2008\\_89.html](http://keldysh.ru/papers/2008/prep89/prep2008_89.html) (accessed 10.12.2017).
4. Callan R. *The Essence of neural networks*. London, Prentice Hall, 1999 (Russ. ed.: Kalan R. *Osnovnye kontseptsii neironnykh setei*. Moscow, Williams Publ., 2001. 291 p.).
5. Voevoda A.A., Markov A.V., Romannikov D.O. *Razrabotka programmogo obespecheniya: proektirovanie s ispol'zovaniem UML diagramm i setei Petri na primere ASU TP vodonapornoi stantsii* [Software development: software design using uml diagrams and petri nets for example automated process control system of pumping station]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 3 (34), pp. 218–232.

6. Markov A.V. Svoistva inversii setei Petri [Properties inversion Petri nets]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 139–152.
7. Al-Shayea Q.K. Artificial neural networks in medical diagnosis. *International Journal of Computer Science Issues*, 2011, vol. 8, iss. 2, pp. 130–154.
8. Capannini G., Silvestri F., Baraglia R. Sorting on GPUs for large scale datasets: a thorough comparison. *Information Processing and Management*, 2011, vol. 48 (5), pp. 903–917.
9. Barskii A.B. *Neironnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie reshenii* [Neural network: recognition, control, accept solutions]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 176 p.
10. Haykin S. *Neural networks*. Upple Saddle River, Prentice Hall, 1999 (Russ. ed.: Khaikin S. *Neironnye seti. Polnyi kurs*. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p.).
11. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Neironnye seti* [Neural network]. Moscow, Dialog –MIFI Publ., 2002. 496 p.
12. Yakh"yaeva G.E. *Nechetkie mnozhestva i neironnye seti* [Fuzzy sets and neural networks]. Moscow, Binom Publ., 2006. 374 p.
13. Komashinskii V.I., Smirnov D.A. *Neironnye seti i ikh primenenie v sistemakh upravleniya svyazi* [Neural networks. Using in communications system]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2003. 94 p.
14. Zagumenov A.V. *Komp'yuternaya obrabotka zvuka* [Analyzing sounds by computer]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 580 p.
15. Loyanich A.T. *Zapis' i obrabotka zvuka na komp'yutere* [Write and analyzing sounds]. Moscow, Eksmo Publ., 2008. 390 p.
16. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Asinkhronnyi algoritm sortirovki massiva chisel s ispol'zovaniem ingibitornykh setei Petri [Asynchronous sorting algorithm for array of numbers with the use of inhibitory Petri nets]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 3 (34), pp. 218–232.
17. Voevoda A.A., Polubinskii V.L., Romannikov D.O. Sortirovka massiva tselnykh chisel s ispol'zovaniem neironnoi seti [Sorting the array of integers using a neural network]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 151–157.

Для цитирования:

Черданцев К.А., Кладько А.В. Анализ звукового спектра голосовых команд с помощью нейронной сети // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 65–76.

For citation:

Cherdantsev K.A., Kladko A.V. Analiz zvukovogo spektra golosovykh komand s pomoshch'yu neironnoi seti [Analysis of the sound spectrum of voice commands with the neuron network]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 65–76.

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621. 396

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕТРАНСЛЯЦИОННОЙ ЛИНИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ\*

Б.И. ФИЛИППОВ<sup>1</sup>, А.А. РУДКОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук E-mail: filippov-boris@rambler.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры защиты информации E-mail: rudkovskiyalex@gmail.com

Проектирование ретрансляционных линий начинается с выбора трасс. При этом учитываются проведенные технико-экономические изыскания, а также общие рекомендации по выбору трасс, связанные с обеспечением устойчивой связи на интервалах ретрансляционных линий. В работе рассматривается проектирование ретрансляционной линии с учетом особенностей гидроакустического канала связи. При заданных постоянных электрических характеристиках аппаратуры ретрансляционной линии сигнал на входе гидроакустического приемника станции ретранслятора будет определяться конкретными условиями распространения акустических волн. Снижение устойчивости уровня сигнала на интервалах ретрансляционных линий, т. е. уменьшение его среднего уровня и увеличение глубины и продолжительности замираний, обусловлено следующими факторами: искривлением траекторий акустических волн при изменении состояния гидросферы (придонного слоя); влиянием отражений от подстилающей поверхности; влиянием отражений от слоистых неоднородностей, возникающих в придонном слое. Неблагоприятными являются случаи прохождения трассы по равнинной поверхности, так как в этих условиях отраженный от дна луч по интенсивности соизмерим с прямым. Одним из способов уменьшения влияния отраженного луча является такое размещение ретрансляторов, при котором отраженный луч может полностью экранироваться естественными возвышенностями. Подобными же способами может быть достигнуто ослабление влияния отражений от слоистых неоднородностей. С этой точки зрения благоприятными являются трассы, проходящие по сильно пересеченной местности, так как образование резко выраженных низко расположенных горизонтальных слоев над такими трассами маловероятно. В работе приведен расчет множителя ослабления напряженности поля в месте приема и на открытых интервалах. Показано, что электрическая мощность, которая должна быть подведена к передающей антенне, равна 4 Вт, что вполне приемлемо.

---

\* Статья получена 29 сентября 2017 г.

**Ключевые слова:** гидроакустический канал, многолучевое распространение волн, рельеф дна, гидроакустический ретранслятор, гидроакустическая радиорелейная линия, взаимные помехи, устойчивость сигнала приемника, множитель ослабления, электрическая мощность сигнала

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-77-96

## ВВЕДЕНИЕ

Как показывают экспериментальные исследования, статистические характеристики гидроакустических каналов связи (ГАКС) имеют свои аналоги в коротковолновых, УКВ и других радиоканалах с переменными параметрами. Поэтому разработанные для этих каналов принципы и методы могут быть использованы и в системах передачи информации, использующих ГАКС, конечно, с учетом специфических свойств распространения акустических сигналов в водной среде [2–12]. В работах [8, 10, 11] речь идет о моделировании гидроакустического канала, что в общем-то понятно, если учесть, что получение экспериментальных данных для таких каналов – весьма трудоемкая и затратная проблема.

Наибольший интерес представляет работа [9], которая в основном подтверждает результаты, полученные в исследованиях [2] (статистические характеристики сигналов и помех в гидроакустическом канале) и [12] (применение помехоустойчивого кодирования в таких каналах).

Проектирование ретрансляционных линий начинается с выбора трасс. Вначале проводится предварительный выбор трасс по топографическим картам. При этом учитываются проведенные технико-экономические изыскания, а также общие рекомендации по выбору трасс, связанные с обеспечением устойчивой связи на интервалах ретрансляционных линий.

Обычно рассматривается несколько вариантов, для которых производится расчет. Общей задачей такого расчета является определение качественных показателей работы ретрансляционных линий и выбор наилучшего варианта. Последний должен характеризоваться наименьшим числом промежуточных станций, наибольшей длиной интервалов между станциями, устойчивостью связи, наименьшими высотами антенных опор, удобством расположения станций и пр.

Методика расчета трасс наземных радиорелейных линий (РРЛ) довольно полно разработана для случая, когда трасса проходит над ровной или холмистой местностью с учетом изменения метеорологических условий на трассе [1].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

При заданных постоянных электрических характеристиках аппаратуры ретрансляционной линии сигнал на входе гидроакустического приемника станции ретранслятора будет определяться конкретными условиями распространения акустических волн. Снижение устойчивости уровня сигнала на интервалах ретрансляционных линий, т. е. уменьшение его среднего уровня и увеличение глубины и продолжительности замираний, обусловлено следующими факторами [2, 13]:

- искривлением траекторий акустических волн при изменении состояния гидросферы (придонного слоя);
- влиянием отражений от подстилающей поверхности;
- влиянием отражений от слоистых неоднородностей, возникающих в придонном слое.

С целью уменьшения влияния поверхности Земли (дна) и окружающего придонного слоя на устойчивость уровня сигнала в месте приема при выборе трасс нужно учитывать следующие обстоятельства.

В качестве подстилающей поверхности (дна), ослабляющей отраженный сигнал в месте приема за счет его рассеяния, благоприятным является изрезанный рельеф дна. Отраженный луч сильно рассеян, иногда и полностью экранирован в «гористой местности». Иными словами, благоприятными условиями можно считать такие, при которых трасса проходит по сильно пересеченной поверхности дна.

Неблагоприятными же являются случаи прохождения трассы по равнинной поверхности, так как в этих условиях отраженный от дна луч по интенсивности соизмерим с прямым.

В случае прохождения трассы ретрансляционной линии над ровной поверхностью рекомендуется располагать антенны ретрансляторов на разных уровнях. Это приводит к перемещению точки отражения ближе к низко расположенной станции, что соответствует уменьшению относительной координаты отражения, а значит, и меньшему изменению просвета на данном интервале [1].

Одним из способов уменьшения влияния отраженного луча является такое размещение ретрансляторов, при котором отраженный луч может полностью экранироваться естественными возвышенностями.

Подобными же способами может быть достигнуто ослабление влияния отражений от слоистых неоднородностей. С этой точки зрения благоприятными являются трассы, проходящие по сильно пересеченной местности, так как образование резко выраженных низко расположенных горизонтальных слоев над такими трассами маловероятно.

На устойчивость входного сигнала приемника ретранслятора влияют помехи, обусловленные мешающим действием сигналов самой ретрансляционной линии или сигналов других систем, частоты которых близки к частотам сигналов данной ретрансляционной линии. Причинами возникновения помех от самой ретрансляционной линии являются [14]:

– во-первых, недостаточное ослабление сигналов, приходящих с противоположного направления при работе ретрансляционной линии по двухчастотному плану распределения рабочих частот;

– во-вторых, возможны взаимные помехи между отдельными станциями ретрансляционной линии, так как не исключается прием сигналов не только от предыдущей станции, но и от других ретрансляторов.

Для борьбы с помехами второго вида при проектировании радиорелейных линий прямой видимости осуществляют изломы в направлении трассы РРЛ. Иными словами, трассу делают «зигзагообразной». Это исключает взаимные помехи от станций, расположенных через несколько интервалов. Однако в разрабатываемой системе реализация этого принципа проблематична.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Построение продольных профилей интервалов гидроакустической радиорелейной линии (ГРЛ) производится с помощью топографических карт после предварительного выбора трассы. Для удобства профили трассы вычерчивают в прямоугольных координатах, откладывая расстояния по оси абсцисс, а высоты – по оси ординат. Чтобы сохранить соответствие построенных на профиле высот показаниям карты, необходимо производить отсчет высот от уровня моря (или любого условного нулевого уровня). При выбранной системе координат линия, изображающая на профиле уровень моря, имеет вид параболы, уравнение которой

$$z = \frac{r_0 r}{2R} \left( 1 - \frac{r}{r_0} \right),$$

где  $r_0$  – протяженность интервала;  $r$  – расстояние от левого конца интервала до точки, в которой определяют величину  $z$ ;  $R$  – радиус Земли.



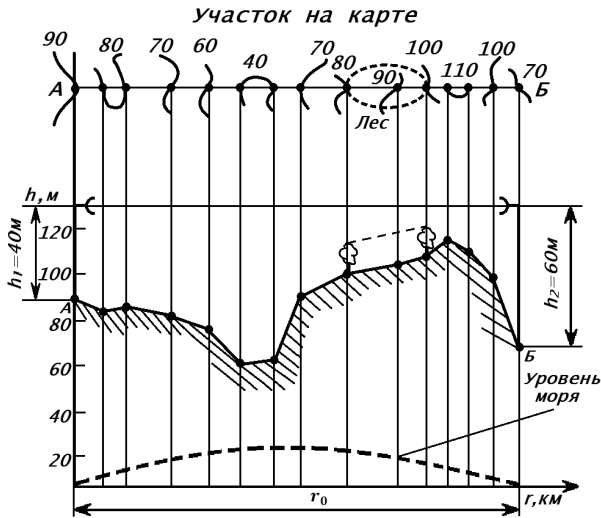


Рис. 1. Пример построения продольного профиля

Продольный профиль интервала строится относительно полученной таким образом линии земной поверхности. При этом по вертикали наносят значения высот местности, взятые из топографической карты в точках пересечения прямой АБ с горизонталями, и соединяют их прямыми линиями. Полученная ломаная линия и является продольным профилем интервала между пунктами А и Б (рис. 1).

### 3. РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ

При определении напряженности поля в месте приема на интервалах ретрансляционных линий необходимо учитывать, что в рассматриваемой системе гидроакустические волны будут распространяться вблизи неровной поверхности дна. При этом напряженность поля в месте приема в реальных условиях распространения этих волн

$$E = E_{св}V,$$

где  $E_{св}$  – напряженность поля в месте приема при распространении в свободном пространстве;  $V$  – множитель ослабления, учитывающий влияние донного слоя и окружающей гидросферы на распространение гидроакустических волн.

Поле в месте приема является результатом интерференции прямой волны, излученной передающей антенной в направлении распространения, и волн, отраженных от дна, и зависит от разности хода указанных волн и характера рельефа местности и почвы. Многообразие реальных природных условий не позволяет создать строгие методы расчета напряженности поля, поэтому при проектировании трасс ретрансляционных линий пользуются приближенными методами, которые дают результаты с точностью, достаточной для инженерной практики.

Для учета характера рельефа местности при расчете напряженности поля на интервалах ретрансляционных линий их классифицируют на открытые, полукрытые и закрытые. Основным параметром этой классификации служит величина зазора (или просвета)  $H$  между линией прямого луча АВ и наивысшей точкой продольного профиля местности (рис. 2).

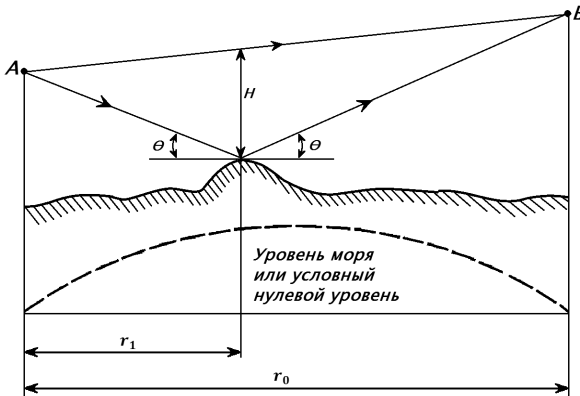


Рис. 2. Построение на профиле интервала для расчета напряженности поля

Эта величина, как следует из простого геометрического рассмотрения, определяет разность хода  $\Delta r$  прямого АВ и отраженного лучей в соответствии с формулой

$$\Delta r = \frac{H^2}{2r_0k(1-k)}, \quad (1)$$

где  $r_0$  – протяженность участка РРЛ;  $k = r_1 / r_0$  – относительная координата точки отражения.

Как известно, при выполнении условия

$$\Delta r = \lambda / 6$$

отраженный луч не ослабляет поле прямого луча. Множитель ослабления при этом  $V = 1$  и  $E = E_{\text{св}}$ .

Из соотношения (1) видно, что величина зазора  $H$ , соответствующая этому случаю, для рабочей длины волны  $\lambda$  равна

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} r_0 \lambda k (1 - k)}. \quad (2)$$

Для различных интервалов выполняются следующие соотношения:

- открытых –  $H > H_0$ ;
- полуоткрытых –  $H_0 > H > 0$ ;
- закрытых –  $H < 0$ .

#### 4. РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НА ОТКРЫТЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Напряженность поля на открытых интервалах определяется условиями интерференции прямой волны и одной или нескольких отраженных от донной поверхности волн. Положение точек отражения находится из условия равенства углов между касательными к профилю в данной точке и прямыми, соединяющими эту точку с точками передачи и приема (рис. 3).

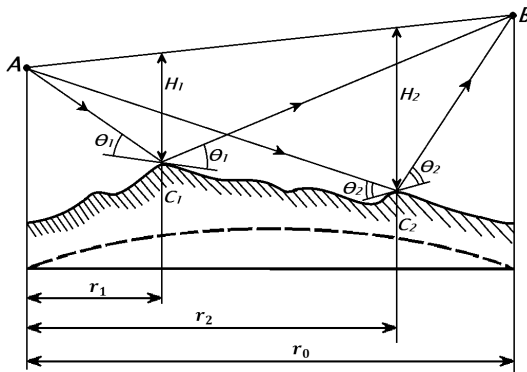


Рис. 3. Построения на профиле интервала при расчете множителя ослабления

Если на интервале имеется  $n$  точек отражения, то модуль множителя ослабления на такой трассе можно представить в виде

$$|V| = \sqrt{(1 + \sum |\Phi_i| \cos \gamma_i)^2 + (\sum |\Phi_i| \sin \gamma_i)^2}, \quad (3)$$

где  $|\Phi_i|$  – модуль коэффициента отражения в  $i$ -й точке;  $\gamma_i$  – фазовый сдвиг между прямой и  $i$ -й отраженной волнами, равный

$$\gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r_i + \beta_i, \quad (4)$$

где  $\Delta r_i$  – разность хода между указанными волнами, определяемая выражением (2);  $\beta_i$  – фаза коэффициента отражения волны в  $i$ -й точке.

Принято считать, что отражение становится диффузным, если в пределах половины первой зоны Френеля высота неровностей поверхности (выступ)  $\Delta h$  удовлетворяет критерию Рэлея:

$$\Delta h > \Delta h_{\max} = \frac{r_0 \lambda k_1 (1 - k_1)}{(4 \div 8) H_i}.$$

Размеры эллипса, вырезаемого половиной первой зоны Френеля на отражающей поверхности, определяются по формулам:

в направлении трассы

$$x = \frac{r_0}{2} \frac{\sqrt{1 + \frac{4h_1 h_2}{\lambda r_0}}}{1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{\lambda r_0}};$$

в направлении поперек трассы

$$y = \frac{\sqrt{\lambda r_0}}{2} \sqrt{\frac{1 + \frac{4h_1 h_2}{\lambda r_0}}{1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{\lambda r_0}}},$$

где  $h_1, h_2$  – высоты подвеса антенн на концах интервала.

При  $\Delta h \leq \Delta h_{\max}$  отражение можно считать зеркальным. При этом модуль коэффициента отражения равен значениям  $|\Phi|$  при отражении от гладкой поверхности. Фазу коэффициента отражения  $\beta$  можно принять равной  $180^\circ$ , так как углы скольжения  $\theta$  всегда малы.

Если отражающая поверхность имеет гладкую выпуклую форму и может быть аппроксимирована частью сферы радиуса  $b$ , то модуль коэффициента отражения уменьшается за счет расходимости отраженной волны согласно выражению

$$|\Phi| = D |\Phi_{\text{пл}}|,$$

где  $|\Phi_{\text{пл}}|$  – коэффициент отражения от плоской поверхности;  $D$  – коэффициент расходимости, равный

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4k_i^2(1-k_i)^2 r_0^2}{bH_i}}}. \quad (5)$$

При этом радиус аппроксимирующей сферы  $b$  вычисляют с помощью величин  $\Delta y$  и  $r$ , определяемых из профиля (рис. 4).

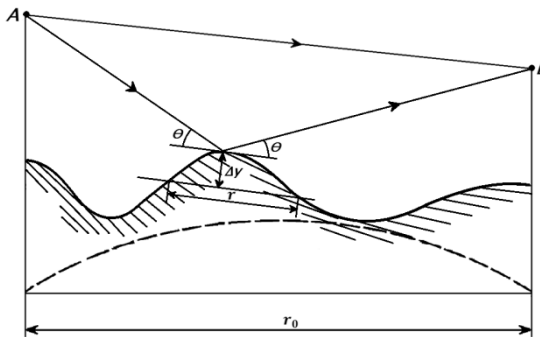


Рис. 4. Определение величин  $\Delta y$  и  $r$

Пользуясь известным соотношением между высотой сегмента  $\Delta y$  окружности радиуса  $b$  и соответствующей ему хордой  $r$

$$b = \frac{r^2}{\Delta y}$$

и подставляя это соотношение в (5), получим

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{32k_i^2(1-k_i)^2 \Delta y}{l^2 H_i}}}, \quad (6)$$

где  $l = r / r_0$ .

В большинстве случаев в реальных условиях встречаются трассы с одной точкой отражения. Для них согласно формуле (3) выражение для множителя ослабления примет вид

$$|V| = \sqrt{1 + |\Phi|^2 + 2|\Phi| \cos \gamma}. \quad (7)$$

Вводя относительную величину зазора

$$p = \frac{H}{H_0},$$

используя формулы (1), (2), (4) и принимая  $\beta = 180^\circ$ , выражение (6) принимает вид

$$|V| = \sqrt{1 + |\Phi|^2 - 2|\Phi| \cos \left( \frac{\pi p^2}{3} \right)}. \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что изменение величины относительного зазора приводит к интерференционному изменению величины множителя ослабления в пределах от

$$|V_m| = 1 + |\Phi_m| \quad \text{при} \quad p = p_m = \sqrt{3(2m-1)}$$

до

$$|V_n| = 1 - |\Phi_n| \quad \text{при} \quad p = p_n = \sqrt{6n}, \quad (9)$$

где  $m, n = 1, 2, 3$  и т. д.

В первом случае имеют место интерференционные максимумы множителя ослабления, так как сигналы прямой и отраженной волн складываются в фазе; во втором случае – интерференционные минимумы, так как сигналы приходят в противофазе. При  $p = 1$ , т. е.  $H = H_0$ , множитель ослабления  $|V| = 1$  [1].

Так как значения  $|\Phi|$  могут быть близки к единице (например, при отражении от гладкой поверхности), то согласно выражению (9) возможно появление глубокого минимума поля, когда  $|I| \approx 0$ . В этом случае необходимо более точное вычисление  $|\Phi_n|$ . Для этого в выражение (6) подставляем величину зазора, соответствующую  $p_n$ :

$$D_n = \frac{1}{\sqrt{1 + 13,1 \frac{\Delta y k^2 (1-k)^2}{H_0 t^2 \sqrt{n}}}}$$

Как показывает соотношение (8), единственным источником изменения множителя ослабления является величина зазора  $H$ , которая определяется высотами подъема передающей и приемной антенн. Причиной изменения  $H$  (при определенных  $h_1$  и  $h_2$ ) является изменение придонных условий и связанное с ним изменение рефракции акустических волн. Поэтому одна из задач проектирования трассы ретрансляционной линии состоит в том, чтобы выбрать такие оптимальные высоты антенн  $h_{1\text{опт}}$  и  $h_{2\text{опт}}$ , при которых при любых изменениях придонных условий уровень сигнала не падал бы ниже минимально допустимого уровня в течение заданного времени.

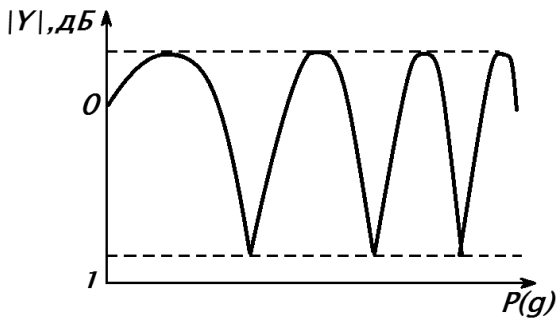


Рис. 5. Зависимость изменения  $|I|$  от относительной величины просвета

Из формулы (8) следует, что величина модуля множителя ослабления  $|I|$  может изменяться в значительных пределах при изменении придонных условий на интервале. При этом зависимость множителя ослабления от величины  $p(g)$  на открытых интервалах носит интерференционный характер (рис. 5).

## 5. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА НА ИНТЕРВАЛАХ РЕТРАНСЛЯЦИОННЫХ ЛИНИЙ

При проектировании ретрансляционных линий обычно рассчитываются средние значения мощности сигналов на входах приемников  $P_{\text{пм}}$  всех интервалов линии, точнее, мощности при среднем значении состояния придонного слоя.

При этом следует иметь в виду, что на практике средние расчетные значения мощности сигналов должны сравниваться со значениями, измеренными в часы, когда наиболее вероятны средние условия состояния придонного слоя.

Средняя мощность сигнала  $P_{\text{пм}}$  является важным параметром, позволяющим оценить точность юстировки антенн, состояние антенно-волноводного тракта и соответствие его потерь нормативным параметрам, а также правильность исходного профиля трассы.

Важным параметром, характеризующим помехоустойчивость ретрансляционных линий, является пороговый уровень мощности сигнала на входе приемника  $P_{\text{пм пор}}$ . При этом уровне обеспечивается максимальная нормируемая величина коэффициента ошибок  $p_{\text{ош max}}$ . Знание и поддержание в заданных нормах среднего и порогового уровней сигнала позволяет в эксплуатационных условиях сохранить заложенный в аппаратуре энергетический запас на замирания сигнала, характеризуемый отношением

$$10 \lg \left( \frac{\bar{P}_{\text{пм}}}{P_{\text{пм пор}}} \right) = -V_{\text{пор}}.$$

Средняя мощность сигнала на входе приемника  $i$ -го интервала ретрансляционной линии рассчитывается по формуле

$$\bar{P}_{\text{пми}} = P_{0\text{пми}} \bar{V}_i^2,$$

где  $P_{0\text{пми}}$  – мощность сигнала на входе приемника  $i$ -го интервала ретрансляционной линии при распространении гидроакустических волн в свободном пространстве;  $\bar{V}_i$  – значение множителя ослабления поля свободного пространства на  $i$ -м интервале при среднем состоянии придонного слоя;

$$P_{0\text{пми}} = \frac{P_{\text{пдл}} G_{\text{пдл}} G_{\text{при}} \lambda^2}{16\pi^2 R_i^2 \eta_{\text{авт}i}},$$



где  $P_{\text{пд}i}$  – мощность передатчика на  $i$ -м интервале РРЛ;  $R_i$  – длина  $i$ -го интервала РРЛ;  $G_{\text{пд}i}$ ,  $G_{\text{пр}i}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн на  $i$ -м интервале ГРЛ;  $\lambda$  – длина волны;  $\eta_{\text{авт}i}$  – потери в приемно-передающем антенно-волноводном тракте (АВТ) на  $i$ -м интервале.

Зададимся максимальной протяженностью линии связи ( $l_{\text{max}}$ ) – расстоянием между ГРЛ – 5 км.

В соответствии с [15] оптимальное значение частоты для линии связи протяженностью 5 км равно

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{62}{r^{2/3}} \approx \frac{62}{5^{2/3}} = 21,204 \text{ кГц.}$$

Ближайшими по рабочей частоте из серийно выпускаемых гидроакустических антенн являются:

– антенны 1D1, выпускаемые согласно техническим условиям ЛУЗ.848.017;

– антенны акустической аппаратуры СКОЛ-2000Р, выпускаемые на основе технических условий СУЦЗ.837.018.

Антенна 1D1 имеет рабочую частоту 11,6 кГц, что в 1,8 раза ниже требуемой; антенна СКОЛ-2000Р – 29,6 кГц, что в 1,4 раза выше требуемой.

Параметры этих антенн приведены в таблице.

#### Технические данные гидроакустических антенн

№ п/п	Наименование параметра	Антенна 1D1, ЛУЗ.848.017	Антенна СКОЛ-2000Р СУЦЗ.837.018
1	Внутреннее сопротивление, МОм, не менее	200	100
2	Сопротивление изоляции, МОм, не менее	200	100
3	Электрическая емкость, пФ	54 000 ± 7500	5000
4	Резонансная частота $f$ , кГц	11,6 $\frac{+0,6}{-0,7}$	29,6
5	Чувствительность в режиме излучения $\beta_a$ , (Па · м) / В, не менее	9	28
6	Активное сопротивление на частоте резонанса $R_a$ , кОм	1,0...1,8	1,6...2,0

Окончание таблицы

№ п/п	Наименование параметра	Антенна 1D1, ЛУ3.848.017	Антенна СКОЛ-2000Р СУЦ3.837.018
7	Чувствительность в режиме приема $\gamma$ , мкВ / Па, не менее	300	800
8	Коэффициент осевой концентрации $K_0$	2	25
9	Ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 от максимума, град	180	44
10	Полоса пропускания $\Delta f_{\text{пр}}$ , кГц, не менее	1,0	1,6
11	Рабочая глубина, м	6000	3000
12	Габаритные размеры, мм	300, $H = 336$	95, $H = 170$
13	Масса, кг	7,2±0,5	1,7

Но антенна 1D1 фактически является ненаправленной, поэтому нежелательна для использования в ГРЛ.

Антенна СКОЛ-2000Р является направленной, но накладывает ограничения на рабочую глубину. Антенна аттестована для работ на глубинах до 3000 м.

Для расчета выбирается антенна СКОЛ-2000Р.

С учетом [13] получим коэффициент затухания акустических колебаний

$$\beta \approx 0,036 f_{\text{раб}}^{1,5} = 0,036 \cdot 29,6^{1,5} = 5,797 \text{ [дБ/км]}.$$

Коэффициент потерь

$$\gamma_E \approx \exp(-0,23 \cdot 5,797 \cdot 5) = 0,018.$$

Требуемое звуковое давление  $P_c$  в плоскости приемной антенны определяется [15] как

$$P_c = \frac{hK_{f_0} \Delta f_{\text{пр}}}{(f/f_0)^2 K_0} = \frac{10 \cdot 0,1 \cdot 50}{(21,204/1)^2 \cdot 25} = 4,448 \cdot 10^{-3} \text{ Па}.$$

Напряжение сигнала на выходе приемной гидроакустической антенны (на входе приемника) будет равно [3]

$$U_{\text{вх}} = \gamma P_c = 800 \cdot 4,448 \cdot 10^{-3} = 3,56 \text{ мкВ.}$$

Используя полученное значение  $P_c$  [5], вычислим

$$P_{\text{изл}} = \frac{P_c r}{\sqrt{10^{-0,1\beta r}}} = 6260 \text{ Па.}$$

Тогда электрическая мощность, которая должна быть подведена к передающей антенне, равна

$$P_3 = \frac{P_{\text{изл}}}{\beta_a^2 R_a} = \frac{6260}{28^2 \cdot 2} = 3,992 \approx 4 \text{ Вт,}$$

что является вполне приемлемым.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа сделан расчет гидроакустической ретрансляционной линии длиной 5 км. Выбрана наиболее подходящая модель гидроакустической антенны (СКОЛ-2000Р). Показано, что электрическая мощность, которая должна быть подведена к передающей антенне, составляет 4 Вт, что можно считать вполне приемлемым.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маглицкий Б.П.* Проектирование ЦРРЛ: учебное пособие для вузов. – Новосибирск: СибГУТИ, 2002. – 63 с.
2. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.*, Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 78–84.
3. *Филиппов Б.И.* Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 55. – С. 33–40.
4. *Филиппов Б.И.* Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 3. – С. 67–77.

5. Справочник по гидроакустике / А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, А.П. Ляликов и др. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
6. *Bluen S., Heard G.J., Pecknold S.* Autonomy and networking challenges of future underwater systems // 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). – Piscataway, NJ: IEEE, 2015. – P. 1514–1519.
7. *Федосов В.П., Легин А.А., Ломакина А.В.* Алгоритмы, основанные на технологии ММО–OFDM, для реализации цифрового гидроакустического канала связи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 148–158.
8. *Литвинцева А.В., Оболонин М.А.* Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3.
9. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel / K.G. Kekal, V.K. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Petroccia // Gyroscopy Andnavigation. – 2016. – Vol. 7, N 4. – P. 343–352.
10. *Khan A.I.R., Gang Q., Mehboob K.* Investigation of channel modeling and simulation of OFDM based communication near northern regions of Arabian sea // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 1169–1182.
11. Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide attenuation and ambient noise / J. Huang, M. Babeau, S. Blouin, C. Hamm, N. Taillefer // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 2017. – Vol. 2. – P. 1–21.
12. *Filippov B.I., Chernetsky G.A.* Increase of reliability of transfer of blocks the digital information on the hydroacoustic communication channel = Повышение достоверности передачи блоков цифровой информации по гидроакустическому каналу связи // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2016. – Vol. 9, iss. 4. – P. 489–499.
13. *Филиппов Б.И.* Алгоритм функционирования системы измерения дистанции с использованием гидроакустического канала связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 4. – С. 87–98.
14. *Лившиц И.П., Орлов И.А.* Имитационное машинное моделирование системы связи в условиях гидроакустического канала передачи сигналов // Труды XXIV Международной конференции и дискуссионного научного клуба «Новые информационные технологии в науке, образовании и бизнесе», Украина, Крым, Ялта–Гурзуф. – Гурзуф, 1997. – С. 29–31.

15. *Филиппов Б.И.* Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 3. – С. 67–77.

**Филиппов Борис Иванович**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория надежности, радиотехника и связь. Опубликовано 41 статья, два учебных пособия и монография. E-mail: [filippov-boris@rambler.ru](mailto:filippov-boris@rambler.ru)

**Рудковский Александр Александрович**, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [rudkovskiyalex@gmail.com](mailto:rudkovskiyalex@gmail.com)

## **Design of the relaying line of a hydroacoustic communication channel\***

**B.I. Filippov<sup>1</sup>, A.A. Rudkovskiy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, associate professor, candidate of technical science. E-mail: [filippov-boris@rambler.ru](mailto:filippov-boris@rambler.ru)*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the information security department E-mail: [rudkovskiyalex@gmail.com](mailto:rudkovskiyalex@gmail.com)*

Design of the relaying line begins with the chose of the traces. Wherein was counted economical-technical researches, and also general recommendation for choosing traces. In the work is consider the design of the relaying line with considering the features of the hydroacoustic communication channel. With the given constants of electrical characteristics of the relaying lines equipment, signal on the entrance of the hydroacoustic receiver of the repeater station will be determine with the specific conditions of the spread of the acoustic waves. Reduction in the stability of the signal level at the intervals of the relay lines, i.e. reduction the middle level and increase the deep and continues of the fading, is caused by the following factors: curvature of the trajectory of acoustic waves when the state of the hydrosphere (bottom layer) changes; print reflections from the underlying surface; poisoning from layered inhomogeneities arising in the bottom layer. Unfavorable are the cases the passage of the traces along a flat surface, since under these conditions the beam reflected from the bottom is of the same intensity as the direct beam. One way to reduce the effect of the reflected beam is to place transponders in which the reflected beam can be completely shielded by natural elevations. In the same way, the weakening of the influence of reflections from layered inhomogeneities can be achieved. From this point of view, it is favorable that the traces pass through a highly rugged terrain, since the formation of sharply expressed low-lying horizontal layers above such traces

---

\* Received 29 September 2017.

is unlikely. The calculation of the factor of the weakening of the field strength at the receiving site and at open intervals is given in the paper. It is shown that the electrical power, which must be connected to the transmitting antenna, is 4 W, which is quite acceptable.

**Keywords:** hydroacoustic channel, multipath wave propagation, bottom relief, hydroacoustic transponder, hydroacoustic radio relay line, mutual interference, stability of the receiver signal, attenuation factor, electric signal power

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-77-96

## REFERENCES

1. Maglitskii B.P. *Proektirovanie TsRRL* [Design DRRL]. Novosibirsk, SibGUTI Publ., 2002. 63 p.
2. Filippov B.I., Chernetskii G.A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [The analysis of statistical characteristics of signals and hindrances in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 3, pp. 78–84.
3. Filippov B.I. Opredelenie naklonnoi dal'nosti mezhdud sudnom i donnoi stantsiei [Determination of slant range between a ship and a bottom station]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2016, no. 55, pp. 33–40.
4. Filippov B.I. Energeticheskii raschet gidroakusticheskikh linii svyazi [Energy calculation of hydroacoustic communication lines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 67–77.
5. Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E., Lyalikov A.P. et al. *Spravochnik po gidroakustike* [Reference on hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 344 p.
6. Bluen S., Heard G.J., Pecknold S. Autonomy and networking challenges of future underwater systems. *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. Piscataway, NJ, IEEE, 2015, pp. 1514–1519.
7. Fedosov V.P., Legin A.A., Lomakina A.V. Algoritmy, osnovannye na tekhnologii MIMO-OFDM, dlya realizatsii tsifrovogo gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 7 (168), pp. 148–158.

8. Litvintseva A.V., Obolonin M.A. Ispol'zovanie lineinogo predskazatelya rechi v programmnoi modeli nizskoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Linear prediction of speech in software model of low speed vocoder over hydroacoustic communication channel]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 3.
9. Kekal K.G., Kebkal V.K., Kebkal A.G., Petroccia R. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 343–352.
10. Khan A.I.R., Gang Q., Mehboob K. Investigation of channel modeling and simulation of OFDM based communication near northern regions of Arabian sea. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 5 (4), pp. 1169–1182.
11. Huang J., Babeau M., Blouin S., Hamm C., Taillefer N. Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide attenuation and ambient noise. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2017, vol. 2, pp. 1–21.
12. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Increase of reliability of transfer of blocks the digital information on the hydroacoustic communication channel. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 489–499.
13. Filippov B.I. Algoritm funktsionirovaniya sistemy izmereniya distantsii s ispol'zovaniem gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithm for the functioning of a distance measuring system using a hydroacoustic communication channel]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016. no. 4, pp. 87–98.
14. Livshits I.P., Orlov I.A. [Simulation machine simulation of the communication system under conditions of the hydroacoustic signal transmission channel]. *Trudy XXIV Mezhdunarodnoi konferentsii i diskussionnogo nauchnogo kluba "Nove informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i biznese"* [Proceedings of the XXIV International Conference and Discussion Science Club "New Information Technologies in Science, Education and Business"], Ukraine, Crimea, Yalta–Gurzuf, 1997, pp. 29–31 (In Russian).
15. Filippov B.I. Energeticheskii raschet gidroakusticheskikh linii svyazi [Energy calculation of hydroacoustic communication lines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya*

*tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics, 2016, no. 3, pp. 67–77.*

Для цитирования:

Филиппов Б.И., Рудковский А.А. Проектирование ретрансляционной линии гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 77–96.

For citation:

Filippov B.I., Rudkovskiy A.A. Proektirovanie retranslyatsionnoi linii gidroakusticheskogo kanala svyazi [Design of the relaying line of a hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 77–96.



УДК 621.396

## ОПИСАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АППАРАТУРЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ\*

Б.И. ФИЛИППОВ<sup>1</sup>, В.А. СПИРЯНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filiprov-boris@rambler.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: spiryanin.v@gmail.com

Разрабатываемая аппаратура гидроакустического канала связи (ГАКС) представляет собой многостанционную систему двухсторонней связи, в которой судно выполняет роль центральной станции, а донные станции – ее абоненты. Управление работой этой многостанционной системы связи должно осуществляться из центральной станции, с судна. Выбор принципов обмена сигналами между судном и автономными донными станциями (АДС) целесообразно осуществить из условий требуемого качества (достоверности) передачи информации по критерию минимума объема оборудования связи, размещаемого в донной станции, и минимального среднего потребления энергии этим оборудованием от автономного источника питания АДС. Другим вопросом, определяющим сложность аппаратуры ГАКС, является выбор метода разделения сигналов между абонентами (донными станциями). В этой связи предложено осуществлять обмен сигналами между судном и АДС в полудуплексном режиме, так как в этом случае часть устройств, размещаемых в корпусе донной станции, может поочередно работать в режимах приема и передачи. Предложено для обмена сигналами использовать двоичные сигналы, передаваемые методом относительной фазовой модуляции со скоростью 200 Бод. Для приема указанных сигналов предлагается применить цифровой корреляционный приемник с глубоким ограничением сигнала на входе, что позволит упростить процедуру вхождения в связь, сократит длительность сеансов связи и уменьшит потребление энергии от автономного источника питания АДС. В качестве сигналов команд управления на одной рабочей частоте работы судна в сети с количеством АДС не более 15; передавать с судна на каждую из АДС до 15 команд управления; получать на судне квитанции о приеме и исполнении на АДС команд управления; передавать на судно из АДС по запросу цифровую формулярную информацию; переводить АДС по команде на работу в режиме гидроакустического маяка с передачей из нее сигнала, содержащего

---

\* Статья получена 09 октября 2017 г.

идентификатор донной станции; осуществлять определение наклонной дальности между судном и АДС при любом обмене сигналами между ними. Все предложенные технические решения ориентированы на применение цифровой микросхемотехники, в первую очередь 8-разрядных цифровых микроконтроллеров.

**Ключевые слова:** гидроакустический канал, аппаратура гидроакустического канала связи, многостанционная система связи, автономные донные станции, судовая центральная станция, относительная фазовая модуляция, сигналы команд управления, стартовые синхронизирующие последовательности, цифровые микроконтроллеры

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-97-127

## ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемая аппаратура гидроакустического канала связи (ГАКС) представляет собой многостанционную систему двухсторонней связи, в которой судно выполняет роль центральной станции, а донные станции – ее абоненты. Управление работой этой многостанционной системы связи должно осуществляться из центральной станции, с судна.

Выбор принципов обмена сигналами между судном и автономными донными станциями (АДС) целесообразно осуществить из условий требуемого качества (достоверности) передачи информации по критерию минимума объема оборудования связи, размещаемого в донной станции, и минимального среднего потребления энергии этим оборудованием от автономного источника питания АДС.

Другим вопросом, определяющим сложность аппаратуры ГАКС, является вопрос метода разделения сигналов между абонентами (донными станциями).

Чтобы сигналы разных донных станций  $S_i(t)$  и  $S_j(t)$  при передаче давали минимум взаимных помех, они должны удовлетворять условию ортогональности

$$\frac{1}{T} \int_0^T S_i(t) S_j(t) dt = \begin{cases} a, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

где  $T$  – интервал ортогональности используемых сигналов, выбирается равным длительности этих сигналов;  $a$  – некоторая постоянная.

В принципе, для разделения сигналов между АДС можно использовать любой из известных методов разделения каналов: временное, частотное и кодовое (по форме сигналов).

Временное разделение сигналов предполагает жесткую временную синхронизацию работы донных станций и по этой причине не нашло применения

при построении аппаратуры гидроакустической связи и управления для донных станций.

Наибольшее распространение в существующих системах гидроакустической связи и управления получило частотное разделение сигналов управления, при котором каждой донной станции как абоненту сети отводится своя полоса частот – частотный канал в пределах некоторой общей полосы частот. При разnose частотных каналов на 100...200 Гц резко увеличивается длительность передаваемых сигналов (до 10...15 с). Если же дискретность частотных каналов увеличивается до 1...2 кГц, то из-за расширения общего диапазона рабочих частот необходимо применение широкополосных нерезонансных гидроакустических антенн, энергетическая эффективность которых достаточно низка. Поэтому следует рекомендовать для реализации в аппаратуре гидроакустического канала связи для АДС использование кодового метода разделения сигналов, допускающего поочередную работу всех донных станций в одном общем частотном диапазоне [1].

В существующих системах связи с кодовым методом разделения для передачи используются шумоподобные сигналы, прием сигналов осуществляется с помощью согласованных фильтров [2].

На длительности элемента сигнала необходимо осуществлять, по крайней мере, хранение, умножение и суммирование многоразрядных отсчетов сигнала. Если в качестве сигналов управления в разрабатываемой аппаратуре применять двоичные последовательности, то их прием может осуществляться с помощью относительно несложного устройства, состоящего из последовательно соединенных приемника двоичных сигналов и соответствующих декодеров и дешифраторов. Подобное выполнение приемного устройства позволяет осуществить синтез аппаратуры в два этапа. На первом этапе осуществляется выбор метода передачи двоичных сигналов и схемы их приема, на втором этапе осуществляется выбор ансамбля сигналов и методов их защиты от ошибок.

Как показывают экспериментальные исследования, статистические характеристики гидроакустических каналов связи (ГАКС) имеют свои аналоги в коротковолновых, УКВ и других радиоканалах с переменными параметрами. Поэтому разработанные для этих каналов принципы и методы построения оборудования могут быть использованы и в системах передачи информации, использующих ГАКС, конечно, с учетом специфических свойств распространения акустических сигналов в водной среде [3–11].

Аппаратура гидроакустического канала связи (ГАКС) предназначена для обеспечения морских геофизических исследований с помощью многофункциональных гидроакустических донных станций (МГАС), объединенных в измерительную сеть.

Аппаратура позволяет:

- передавать с судна на МГАС команды управления [12];
- передавать из МГАС на судно «квитанции» о приеме и исполнении на донной станции команд управления [13];
- определять наклонную дальность между судном и МГАС при любом обмене сигналами между ними [14];
- переводить МГАС по команде с судна в режим гидроакустического маяка;
- осуществлять контроль качества передачи цифровой информации из МГАС путем передачи по каналу специальной испытательной последовательности [15].

Управление работой аппаратуры гидроакустического канала связи осуществляется от судовой ЭВМ, которая одновременно является получателем цифровой информации, передаваемой из МГАС.

По характеру обмена сигналами аппаратура ГАКС представляет собой аппаратно-программный комплекс, который по функциональным признакам можно разделить на следующие составные части:

- донный модуль ГАКС (ДМ ГАКС);
- судовая приемно-обрабатывающая аппаратура (СПОА), которая включает в себя судовую ЭВМ и бортовой модуль ГАКС (БМ ГАКС);
- контрольно-проверочная аппаратура (КПА);
- программно-математическое обеспечение GalsW для ЭВМ приемно-обрабатывающей аппаратуры.

Указанное деление условно, так как контрольно-проверочная аппаратура конструктивно выполнена встроенной в состав бортового и донного модулей аппаратуры ГАКС, а также в качестве соответствующих частей программных средств GalsW.

Связь между бортовым модулем аппаратуры ГАКС и ЭВМ СПОА осуществляется по последовательному каналу типа «токовая петля» (интерфейс RS-232 без сигналов готовности) со скоростью 9600 бит/с при восьми информационных и двух стоповых битах. От ЭВМ СПОА к бортовому модулю аппаратуры ГАКС передаются:

- номер донной станции и номер команды, которая должна быть исполнена на МГАС;
- команды, изменяющие режим работы бортового модуля аппаратуры («передача команд», «прием», «тест», «испытания канала»).

От бортового модуля аппаратуры ГАКС к ЭВМ СПОА передаются:

- подтверждение или неподтверждение приема информации от ЭВМ СПОА, в последнем случае сообщаются также причины ошибки;

- номер донной станции, номер команды, номер кодовой комбинации и контрольный 14-й символ, поступившие на бортовой модуль аппаратуры ГАКС из МГАС в составе сигнала квитанции;
- цифровая информация, принятая бортовым модулем от МГАС в ответ на команду о ее передаче;
- сигнал от МГАС в режиме «маяк»;
- длительность интервала времени между передачей на МГАС команды управления и получением от нее квитанции.

## **1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ**

Основу рассматриваемой сети гидроакустической телеметрии составляют многофункциональные гидроакустические донные станции, расположенные произвольным образом на дне. МГАС оборудованы регистрирующей аппаратурой и аппаратурой гидроакустического канала связи для обмена сигналами с обслуживающим судном.

Работу МГАС, оборудованных аппаратурой ГАКС, в рассматриваемой сети характеризуют следующие основные режимы:

- постановка МГАС;
- режим регистрации информации и ожидания вызова – исходное состояние системы;
- поиск и вызов МГАС;
- обмен сигналами между судном и донной станцией;
- подъем МГАС по команде с судна;
- работа МГАС в режиме гидроакустического маяка.

В соответствии с назначением и архитектурой сети гидроакустических донных станций в работе аппаратуры ГАКС может наблюдаться ряд характерных ситуаций.

1. В сети отсутствует какой-либо обмен сигналами.

При этом бортовой модуль аппаратуры ГАКС может находиться в произвольном состоянии: включенном или выключенном; донные части аппаратуры ГАКС, располагаемые на МГАС, включены и находятся в режиме ожидания («дежурного» приема).

2. Судно осуществляет поиск нужной донной станции, вход в зону связи с этой МГАС, ее вызов.

3. После ответа донной станции аппаратура ГАКС в составе бортового модуля и донного модуля вызываемой донной станции переходит в режим обмена сигналами (передача команд управления, передача квитанций).

4. Осуществляется постановка или подъем одной из МГАС. Аппаратура ГАКС используется для слежения за этой донной станцией в процессе ее погружения и всплытия. Донные части ГАКС остальных МГАС находятся в режиме ожидания вызова.

5. Одна или несколько МГАС работают в режиме гидроакустического маяка.

6. Осуществляется оценка качества функционирования аппаратуры ГАКС. Рассмотрим подробнее каждую из указанных ситуаций.

Адресный метод разделения сигналов между МГАС, реализованный в аппаратуре, предполагает, что в любой момент времени обслуживающее судно может обмениваться сигналами только с одной донной станцией. В это время другие МГАС находятся в режиме ожидания вызова.

С учетом организации обмена сигналами ГАКС можно считать много-станционной системой связи, в которой донные станции являются абонентами, а обслуживающее судно – центральной станцией. Так как в любой момент времени может осуществляться обмен сигналами судна только с одной станцией, то система работает как одноканальная. В то же время при вызове одной из донных станций в сектор обзора гидроакустической антенны центральной станции могут попадать и другие абоненты (донные станции), разделение сигналов между МГАС осуществляется кодовыми методами.

Самым продолжительным по длительности режимом работы аппаратуры ГАКС является режим ожидания вызова. В этом режиме донные части аппаратуры ГАКС переводятся в режим приема и анализа поступающего на вход приемного устройства шума или смеси сигнала и шума. При обнаружении полезного сигнала начинается его прием, после чего передается соответствующий ответный сигнал.

Поиск и вызов донной станции осуществляется после прихода судна в район постановки донной станции. Если судно находится в пределах зоны связи с МГАС, то после передачи с него сигнала вызова осуществляется передача с донной станции ответного сигнала и определение наклонной дальности между судном и МГАС; аппаратура ГАКС переходит в режим обмена сигналами.

Под зоной связи понимается область на поверхности моря, в пределах которой отношение сигнал / шум обеспечивает требуемое качество обмена сигналами между судном и МГАС.

Величина и форма зоны связи в основном определяются характеристиками направленности применяемых гидроакустических антенн, их взаимной ориентацией. При работе по гидроакустическим каналам вертикальной ориентации зона связи представляет собой, как правило, круг с радиусом  $R$ , величина которого определяется не затуханием сигнала вследствие расширения

фронта акустической волны, а шириной диаграммы направленности используемых гидроакустических антенн. Для применяемых в составе ГАКС гидроакустических антенн СУЦЗ.837.018 радиус зоны связи будет примерно равен глубине постановки донной станции

$$R \approx H,$$

где  $H$  – глубина постановки МГАС.

Таким образом, задача поиска донной станции сводится к задаче установления факта вхождения судна в пределы зоны связи с МГАС.

Цель обмена сигналами между судном и МГАС – проверка работоспособности донных станций, изменение режимов их работы. Изменение режима работы МГАС осуществляется по команде с судна. Каждая из команд управления содержит адресную часть, по которой осуществляется разделение сигналов в сети между МГАС, и собственно команду управления, вернее, «номер» этой команды управления. Для повышения «гибкости и живучести» системы в аппаратуре ГАКС образован канал обратной связи, по которому с МГАС на борт судна в ответ на каждую принятую команду управления передается «квитанция». Квитанция содержит признак донной станции, ее идентификатор и номер принятой и исполненной на МГАС команды управления [12].

Слежение за МГАС в процессе ее постановки и подъема позволяет осуществлять проверку работоспособности донной станции, фиксировать момент постановки донной станции на грунт, отрыв ее от грунта и выход на поверхность моря, облегчить поиск всплывшей донной станции.

Слежение за МГАС может быть организовано на основе периодического определения наклонной дальности до погружающейся (всплывающей) донной станции.

Работа МГАС в режиме гидроакустического маяка осуществляется после получения на донной станции от судна соответствующей команды управления. Выключение маяка также осуществляется по команде управления. Сигнал маяка содержит идентификатор донной станции. Передача сигналов выполняется в канале управления. В аппаратуре гидроакустического канала связи работа всех донных станций осуществляется на одной общей рабочей частоте; обмен сигналами между судном и МГАС осуществляется сеансами и начинается передачей с судна команды управления. В аппаратуре реализован асинхронно-адресный принцип разделения сигналов, который заключается в разбиении всего множества кодированных сигналов, используемых для передачи команд управления в сети МГАС, на 15 подмножеств, соответствующих количеству абонентов сети (донных станций) [12, 16]. Сигналы каждого из подмножеств используются для передачи команд управления соответствующим

щему абоненту (МГАС); остальные абоненты на сигналы данного подмножества не реагируют. Отличие в сигналах заложено на структурном уровне на этапе их формирования.

В качестве сигналов команд управления в аппаратуре используется шестикратное повторение (без перерыва) кодовой комбинации команды, каждая из которых состоит из стартовой комбинации длиной 32 символа, кодовой комбинации циклического кода (32, 16) [16]. Суммарная длина сигнала команды управления  $(32 + 32) \cdot 6 = 384$  символов.

Команда управления считается принятой, если хотя бы в одной из шести поступивших на донную станцию кодовых комбинаций команды не обнаружено ошибок.

В случае приема на МГАС команды управления из донной станции в направлении судна передается сигнал квитанции, состоящий из следующих друг за другом без перерыва шести проинвертированных кодовых комбинаций соответствующей команды управления.

На рис. 1 приведена структура сигналов команд управления и квитанций [16, 17].

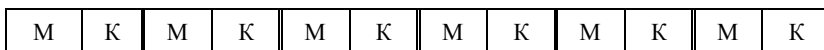


Рис. 1. Структура сигналов команд управления и квитанций:

М – стартовая последовательность; К – кодовая комбинация циклического кода (32, 16)

Распределение 16 информационных символов кодовой комбинации циклического кода (32, 16) сигналов команд управления и квитанций представлено на рис. 2.

Первые четыре символа (с первого по четвертый, обозначаемые символом А) используются для задания в двоичной форме адреса абонента (номера донной станции). Номера донных станций задаются четырехразрядными двоичными числами с 0001 по 1111 включительно. Следующие пять символов (с пятого по девятый, обозначаемые символом К) используются для задания в двоичной форме номера команды управления, передаваемой на донную станцию. Номера команд задаются пятиразрядными двоичными числами с 00001 по 11111 включительно. Символы с 11 по 13, обозначаемые символом Р, используются для нумерации кодовых комбинаций команд управления (номер пары) в составе сигнала управления. Указанная нумерация применяется при определении наклонной дальности между судном и МГАС. Алгоритм определения наклонной дальности описан ниже. Нумерация кодовых комбинаций команд управления в составе сигнала управления осуществляется трехразрядными двоичными числами с 001 по 110 включительно. Символ с номером 14,



обозначенный Е, является служебным. При передаче команд управления символу Е всегда присваивается значение логического нуля. В составе сигнала квитанции символу Е присваивается значение логической единицы, если в течение 0,25 с после приема команды управления от датчиков донной станции не поступает признак исполнения этой команды. Символы 10, 15 и 16, помеченные буквой R, являются резервными.

Любой обмен сигналами между СПОА и МГАС сопровождается определением наклонной дальности между ними [3].

A	A	A	A	K	K	K	K	K	R	P	P	P	E	R	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 2. Распределение 16 информационных символов кодовой комбинации циклического кода (32, 16):

A – символы, используемые для задания адреса МГАС; K – символы, используемые для задания номера команды, передаваемой на МГАС; P – символы, используемые для задания номера кодовой комбинации (номер пары) в составе сигнала команды управления или квитанции; E – служебный символ, используемый для передачи на судно признака неисполнения на МГАС принятой команды управления; R – резервные символы

Перечень команд, используемых в аппаратуре ГАКС, приведен в табл. 1. Команды 1–13 предназначены для изменения режимов работы МГАС; команды 25, 26 – для включения и выключения на МГАС гидроакустического маяка, команды 24, 31 используются для проверки работоспособности аппаратуры ГАКС, команды 14–23 и 27–30 – резервные.

Таблица 1

**Перечень команд управления, передаваемых с судна на МГАС**

Номер команды	Назначение команды
1	Включение МСБ
2	Включение УМ
3	Уровень излучения 1
4	Уровень излучения 2
5	Уровень излучения 3
6	Частота излучения 1
7	Частота излучения 2
8	Частота излучения 3
9	Включение регистратора непрерывно
10	Включение регистратора программно

Окончание табл. 1

Номер команды	Назначение команды
11	Выключение регистратора
12	Включение режима 1
13	Выключение режима 1
с 14-й по 23-ю	Резерв
24	Тест
25	Включение гидроакустического маяка
26	Выключение гидроакустического маяка
с 27-й по 30-ю	Резерв
31	Испытания канала в режиме передачи данных

### Алгоритм передачи команд управления

В исходном состоянии донные станции сети находятся в режиме дежурного приема, в котором в приемных устройствах соответствующих МГАС производится анализ смеси сигналов и шумов, действующих на их входах; бортовой модуль ГАКС находится в произвольном режиме.

При необходимости передачи команды управления на одну из МГАС судно осуществляет поиск донной станции, входит в зону связи с ней.

На пульте оператора, реализованном с помощью программы GalsW на ЭВМ СПОА, осуществляется набор номера вызываемой МГАС и номера передаваемой на нее команды управления. После нажатия на пульте клавиши «Передать команду» по последовательному каналу от ЭВМ в бортовой модуль ГАКС передается управляющий сигнал, по которому в бортовом модуле ГАКС формируется сигнал команды управления.

Сигнал команды управления гидроакустической антенной излучается в направлении донной станции; при этом для целей определения наклонной дальности фиксируется момент времени  $t_1$ , соответствующий моменту окончания передачи сигнала управления [14].

Сигнал команды управления поступает на вход приемного устройства донного модуля аппаратуры ГАКС, демодулируется и подается на 32-разрядный дешифратор стартовой последовательности. При обнаружении стартовой последовательности следующие за ней 32 символа кодовой комбинации циклического подаются на параллельно соединенные дешифратор адреса и декодер циклического кода (32, 16).

В дешифраторе происходит сравнение первых четырех символов кодовой комбинации циклического кода с адресом (номером) донной станции, представленном в двоичной форме. Если эти четыре символа совпадают с адресом МГАС, то начинается декодирование комбинации циклического кода. Если при декодировании 32-го символа кодовой комбинации циклического кода (32, 16) обнаруживается ошибка, то приемник вновь переводится в режим обнаружения стартовой последовательности [16]. Следует отметить, что для защиты циклического кода (32, 16) от циклических сдвигов проверочные символы в составе кодовых комбинаций передаются в инверсном виде.

При отсутствии ошибок в кодовой комбинации циклического кода (32, 16) команда управления считается принятой; фиксируется момент времени принятия команды  $t'_1$ ; определяется номер кодовой комбинации (номер пары) в составе сигнала команды управления. В момент окончания сигнала команды управления она подается на исполнение. На исполнение команды управления резервируется интервал времени  $T_0$  длительностью 250 мс.

По истечении 250 мс после окончания сигнала команды управления на МГАС начинается формирование и передача в направлении судна сигнала квитанции.

Сигнал квитанции, как уже указывалось выше, состоит из следующих друг за другом без перерыва шести проинвертированных кодовых комбинаций соответствующей команды управления. При этом в случае неисполнения команды управления в течение интервала  $T_0 = 250$  мс после ее приема в 14-м разряде информационной части (символ Е) кодовой комбинации циклического кода (32, 16) передается лог. 1.

В бортовом модуле аппаратуры ГАКС осуществляется демодуляция сигнала квитанции, после чего он подается на дешифратор стартовой последовательности. При обнаружении стартовой последовательности следующие за ней 32 символа кодовой комбинации циклического кода подаются на декодер циклического кода (32, 16). Если при декодировании кодовой комбинации циклического кода (32, 16) обнаруживается ошибка, то приемник переводится в режим обнаружения стартовой последовательности. При отсутствии ошибок в кодовой комбинации циклического кода (32, 16) квитанция считается принятой. Фиксируются момент времени  $t_2$  приема квитанции. Определяется продолжительность интервала времени  $\Delta T$  между передачей с судна сигнала команды управления и приема на нем сигнала квитанции;  $\Delta T = t_2 - t_1$ .

Выделенные из принятой квитанции адрес (номер МГАС), номер принятой на МГАС команды управления, служебный бит Е, а также число, соответствующее длительности интервала времени  $\Delta T$ , подаются по последователь-

ному каналу в ЭВМ СПОА, где в соответствующем виде отображаются на экране монитора.

В случае непринятия на судне сигнала соответствующей квитанции в течение 20 с после передачи сигнала команды управления из бортового модуля ГАКС в ЭВМ СПОА выдается соответствующий сигнал, по которому на монитор выдается сообщение: «Нет ответа ДС» [13].

### **Работа МГАС в режиме гидроакустического маяка**

Перевод МГАС в режим гидроакустического маяка осуществляется по команде № 25. В режиме гидроакустического маяка донный модуль аппаратуры ГАКС с периодичностью в 30 с излучает сигнал, совпадающий по структуре сигналом квитанции. Сигнал гидроакустического маяка состоит из следующих друг за другом шести кодовых комбинаций гидроакустического маяка, каждая из которых состоит из 32-разрядной стартовой и 32-разрядной кодовой комбинации циклического кода (32, 16). Стартовая последовательность сигнала гидроакустического маяка полностью совпадает со стартовой последовательностью сигнала квитанции. Отличие сигнала гидроакустического маяка от сигнала квитанции заложено в информационной части кодовой комбинации циклического кода (32, 16). У сигнала гидроакустического маяка в информационной части кодовой комбинации циклического кода отличны от нуля первые четыре символа, в которые заложен адрес МГАС, остальные 12 символов информационной части равны нулю.

Прием сигнала гидроакустического маяка на судне осуществляется аналогично приему сигнала квитанции; на экран монитора ЭВМ СПОА выдается сообщение «маяк» с указанием адреса МГАС.

Выключение гидроакустического маяка осуществляется по команде № 26.

### **Алгоритм определения наклонной дальности между судном и МГАС**

Определение наклонной дальности между судном и МГАС осуществляется расчетным путем на основе измерения времени распространения  $\Delta t$  акустического сигнала от судна до МГАС и обратно [14]. Измерение времени распространения осуществляется по системе «запрос – ответ»; при этом МГАС выполняет роль маяка – ответчика. Измерение времени распространения  $\Delta t$  акустического сигнала от судна до МГАС и обратно осуществляется при передаче с судна любой из команд управления.

Для измерения времени распространения  $\Delta T$  акустического сигнала от судна до МГАС и обратно осуществляется измерение временного интервала  $\Delta T$  между моментом времени  $t_1$  окончания передачи с судна команды управления и моментом времени  $t_2$  приема на судне сигнала квитанции.

Рассмотрим работу аппаратуры в режиме определения наклонной дальности.

В момент окончания передачи сигнала команды управления с бортового модуля аппаратуры ГАКС запускается счетчик измерения временного интервала  $\Delta T$ .

На донной станции осуществляется прием сигнала команды управления. При обнаружении кодовой комбинации, не искаженной помехами, определяется порядковый номер  $p$  этой кодовой комбинации в составе сигнала команды управления; включается таймер переменной задержки, который обеспечивает выдачу своего выходного сигнала спустя время  $T_{\text{зад}}$  после приема сигнала команды управления (после обнаружения первой не искаженной помехами кодовой комбинации с номером  $p$ ). Длительность времени задержки  $T_{\text{зад}}$  задается из условия

$$T_{\text{зад}} = (6 - p) \frac{64}{V} = 0,32(6 - p) \text{ [с]}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость модуляции;  $V = 200$  Бод.

После срабатывания таймера команда подается на исполнение. Через промежуток времени  $T_0 = 0,25$  с, отведенный на исполнение команды, после приема команды управления из донной станции на судно передается сигнал квитанции.

Бортовой модуль аппаратуры ГАКС осуществляет прием сигнала квитанции. При обнаружении кодовой комбинации, не искаженной помехами, останавливается счетчик измерения временного интервала  $\Delta T$ , определяется порядковый номер  $p$  этой кодовой комбинации в составе сигнала квитанции. Число, соответствующее длительности временного интервала  $\Delta T$ , и номер  $p$  по последовательному каналу подаются в ЭВМ СПОА, в которой производится расчет наклонной дальности  $D$  до МГАС по формуле

$$D = \frac{C}{2} (\Delta T - 0,32p - 2,17 - \delta_t),$$

где  $C$  – скорость звука в воде, в расчетах принимается  $C = 1500$  м/с;  $\delta_t$  – юстировочная поправка, учитывающие технологические задержки в аппаратуре.

Рассчитанное значение наклонной дальности до донной станции  $D$  в метрах отображается на мониторе.

Цель проверки качества функционирования аппаратуры ГАКС – определение ее работоспособности в рабочих условиях при нахождении МГАС под водой.

Проверка работоспособности аппаратуры осуществляется путем проведения статистических испытаний в двух режимах:

- в режиме передачи команд управления;
- в режиме передачи тестовой информации.

Проверка работоспособности в режиме передачи команд управления проводится путем многократной передачи и контроля прохождения команды № 24 по кольцу управления: ЭВМ СПОА – бортовой модуль ГАКС – гидроакустический канал связи – донный модуль ГАКС – гидроакустический канал связи – бортовой модуль ГАКС – ЭВМ СПОА. В процессе проведения испытаний в режиме передачи команд управления оцениваются вероятность неприема квитанции бортовым модулем и величина наклонной дальности до МГАС [13, 14].

Алгоритм работы аппаратуры при проверке ее работоспособности в режиме передачи команд управления полностью соответствует режиму передачи команд управления, описанному ранее.

Цель проверки работоспособности аппаратуры ГАКС в режиме передачи тестовой информации – оценка вероятности искажения цифровой информации в канале связи. В этом режиме по команде управления № 31 из МГАС на судно передается известный тестовый отрезок псевдослучайной последовательности длиной 2072 бит [13].

После приема команды № 31 на донной станции из нее в направлении судна передаются сначала соответствующий сигнал квитанции, непосредственно за ним без перерыва начинает передаваться тестовый отрезок псевдослучайной последовательности длиной 2072 бит.

Прием квитанции в судовой части аппаратуры ГАКС в этом случае осуществляется аналогично рассмотренному выше алгоритму приема квитанции, описанном ранее при рассмотрении алгоритма передачи команд управления. Адрес ГДАС, номер принятой на ГДАС команды управления, служебный бит Е, длительность интервала времени  $\Delta T$  подаются по последовательному каналу в ЭВМ СПОА, вслед за ними из судовой части ГАКС в ЭВМ подаются 2072 символа тестового отрезка псевдослучайной последовательности. Принятый тестовый отрезок сравнивается с соответствующим отрезком, генерируемым в ЭВМ.

В процессе проведения испытаний в режиме передачи тестовой информации оцениваются вероятность искажения цифровой информации в канале под действием помех, вероятность неприема квитанции бортовым модулем и величина наклонной дальности до МГАС.

Обмен сигналами между ЭВМ СПОА и бортового модуля аппаратуры ГАКС осуществляется в последовательном виде на скорости 9600 бит/с 8-разрядными старт-стопными комбинациями (стык RS-232). Протокол обмена сигналами между ЭВМ СПОА и бортовым модулем ГАКС представлен на рис. 3 [13].

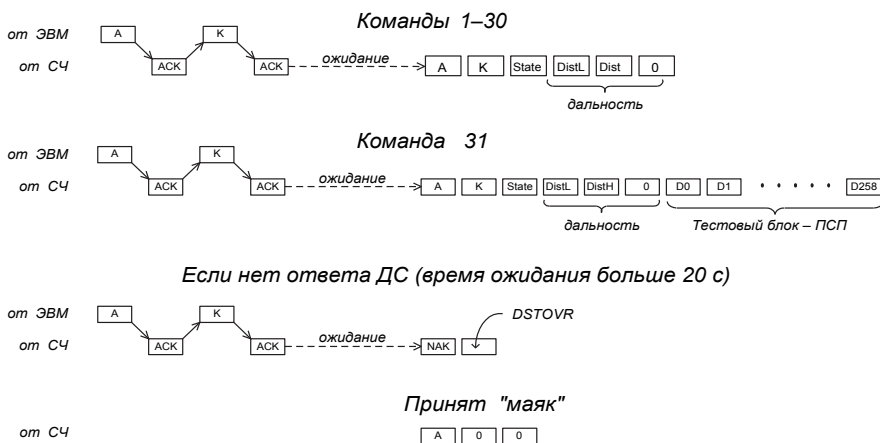


Рис. 3. Протокол обмена сигналами между ЭВМ СПОА и бортовым модулем аппаратуры ГАКС по последовательному каналу (RS-232)

Основным режимом работы бортового модуля является режим приема, на рисунке он обозначается как «ожидание». Перевод бортового модуля в режим передачи осуществляется после получения от ЭВМ СПОА двух байтов, обозначенных А и К. В байте А задается номер вызываемой донной станции, в байте К указывается номер команды, которую необходимо исполнить на МГАС. Прием каждого из указанных байтов сопровождается передачей в ЭВМ СПОА сигнала подтверждения АСК. Если в байтах А и К обнаруживаются ошибки, то в ЭВМ СПОА передается признак ошибки NAK. Одновременно с окончанием передачи на МГАС команды управления включается счетчик интервала времени, который подсчитывает продолжительность интервала времени между окончанием передачи с судна команды управления и приемом от нее сигнала квитанции.

Если на МГАС передавалась команда управления с номером от 1 до 30, то при приеме квитанции на судне в ЭВМ СПОА последовательно передаются 6 байт. В первом байте А передается номер ответившей МГАС, во втором байте К – номер принятой на МГАС команды, в третьем байте State – номер

принятой кодовой комбинации сигнала квитанции (номер пары), в этом же байте передаются служебный бит E. В четвертом, пятом и шестом байтах (DistL, DistH, 0) в ЭВМ передается 20-разрядное двоичное число – длительность интервала времени между передачей команды и приемом сигнала квитанции (DistL – младший байт, DistH – старший байт и нулевой байт).

При передаче с судна команды 31 после приема квитанции вслед за байтами DistL, DistH, «0» в ЭВМ СПОА передаются 2072 байт данных D0...D258.

Если в течение 20 с после передачи команды управления не фиксируется прием квитанции, то в ЭВМ СПОА передается два байта – NAK и DSTOVR.

При приеме сигнала маяка в ЭВМ СПОА передается три байта: байт A с номером МГАС, далее два нулевых байта.

Применяемая для задания указанных сигналов обмена система кодов приведена в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Система кодирования сигналов, передаваемых от ЭВМ СПОА к бортовому модулю аппаратуры ГАКС**

Условное обозначение	Код (16-ричный)	Назначение	Примечание
RES	10	Запрос идентификатора программы контроллера	
TST0	30	Пустая команда	Используется как тест обмена ЭВМ–ГАКС
TST1	31	Начать непрерывную передачу (по ГАК) повторяющейся тестовой последовательности 000...	Используются для проверки аппаратуры, при ее эксплуатации не применяются
TST2	32	То же для последовательности 001...	
TST3	33	То же для последовательности 011...	
TST4	34	То же для последовательности 001...	
TST5	35	То же для последовательности 1010...	
Addr	1...F	Адрес ДС (1–15)	Для передачи по ГАК
Comm	1...1F	Команда (1–31)	



Таблица 3

**Система кодирования сигналов, передаваемых от бортового модуля аппаратуры ГАКС к ЭВМ СПОА**

Условное обозначение	Код (16-ричный)	Назначение	Примечание
Нет	См. примеч.	Идентификатор программы	Строка «GMS X.XX», где X.XX – номер версии
ACK	06	Подтверждение	Передается в ответ на каждый принятый от ЭВМ и допустимый байт
NAK	15	Отрицание подтверждения	Передается в ответ на каждый принятый от ЭВМ недопустимый байт при ошибке в линии RS-232, при отсутствии ответа от ДС
ERC	80	Принята несуществующая команда	Второй байт после NAK
DSTOVR	20	Нет ответа от ДС	
InAddr	1...F	Адрес ДС (1–15)	Принятые от ДС по ГАКС
InComm	0...1F	Команда (1–31) или признак маяка (0)	
State	—	Номер принятой ДС пары адрес + команда (биты 0–3) и признак невыполнения команды (бит 6)	
DistL, DistH, 0	—	Код дистанции	Передаются младший байт DistL, старший байт DistH и нулевой байт
D0...D258	—	Тестовая последовательность	Псевдослучайная

После предварительных замечаний можно перейти к описанию структурных схем аппаратуры ГАКС.

## 2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ АППАРАТУРЫ ГАКС

Структурная схема донного модуля ГАКС приведена на рис. 4. В его составе можно условно выделить гидроакустическую антенну D1, антенный модуль, устройство дискретной обработки и формирования донного модуля (УДОФД).

В качестве гидроакустической антенны D1 в аппаратуре применена серийная гидроакустическая антенна СУЦЗ.837.018 с рабочей частотой  $f_0 = 29,6$  кГц, которая обеспечивает преобразование электрических сигналов в ультразвуковую форму в режиме передачи и ультразвуковых сигналов в электрические в режиме приема. Формирование сигналов в режиме передачи и обработка сигналов в режиме приема осуществляется устройством дискретной обработки и формирования. УДОФ включает в свой состав цифровой приемопередатчик сигналов относительной фазовой модуляции (ОФМ), кодер и декодер применяемых в аппаратуре ГАКС сигналов, таймер контроля времени исполнения команды управления, устройство обмена (УО) сигналами с устройствами МГАС.

Согласование уровней сигналов гидроакустической антенны D1 с УДОФД в режимах передачи и приема осуществляется с помощью входящих в состав антенного модуля усилителя мощности (УМ) D4 и предварительного усилителя D3 соответственно.

Предварительный усилитель (ПУ) D3 построен по схеме апериодического усилителя с коэффициентом передачи  $K_{\text{ПУ}} \approx 250$ , чувствительность ПУ около 7 мкВ.

Выходной сигнал  $S(t)$  предварительного усилителя поступает на вход избирательного усилителя D5 УДОФД, который предназначен для предварительной фильтрации принимаемого сигнала ОФМ и подавления помех, находящихся за пределами полосы частот сигнала. Избирательный усилитель D5 настроен на среднюю частоту сигнала ОФМ  $f_0 = 29,6$  кГц, полоса пропускания усилителя  $2\Delta f \approx 3$  кГц; суммарный коэффициент передачи предварительного и избирательного усилителей D3 и D5 соответственно должен лежать в пределах от 100 000 до 150 000.

На выходе избирательного усилителя D5 включен усилитель-ограничитель D6, обеспечивающий преобразование принимаемого сигнала ОФМ синусоидальной формы в последовательность  $S_n(t)$  импульсов прямоугольной формы скважности два.

Основная фильтрация принимаемого сигнала относительной фазовой модуляции осуществляется в цифровом некогерентном приемнике, реализованном на основе последовательно соединенных двух одноразрядных перемножителей D9 и D10, двух интеграторов D11 и D12, решающего устройства (РУ) D13, системы тактовой синхронизации (СТС) D14. Часть приемника в составе двух интеграторов D11 и D12, решающего устройства D13 и системы тактовой синхронизации D14 выполнена программным способом на однокристалльном микроконтроллере фирмы Microchip; на схеме он обозначен как «1-й микроконтроллер PIC».

Демодуляция сигнала ОФМ  $S_n(t)$  осуществляется путем вычисления пары его проекций  $X_n$  и  $Y_n$  на квадратурные составляющие  $S_n(2\pi f_0 t)$  и  $C_n(2\pi f_0 t)$ , соответствующие знаку опорных сигналов  $\sin(2\pi f_0 t)$  и  $\cos(2\pi f_0 t)$ , формируемых в генераторе эталонных сигналов (ГЭС) D7:

$$X_n = \int_0^T S_n(t) \cdot S_n(2\pi f_0 t) dt,$$

$$Y_n = \int_0^T S_n(t) \cdot C_n(2\pi f_0 t) dt,$$

где  $T$  – длительность элемента сигнала ОФМ,  $T = 5$  мс.

Вычисленные значения проекций  $X_n$  и  $Y_n$  подаются в решающее устройство (РУ) D13, где сначала осуществляется оценка фазы  $\Phi_n$  принимаемого сигнала по правилу:

$$\Phi_n = \begin{cases} -\pi - Y_n & \text{при } (|X_n| > |Y_n|) \ \& \ (X_n \leq 0) \ \& \ (Y_n \leq 0), \\ -\frac{\pi}{2} + X_n & \text{при } (|X_n| \leq |Y_n|) \ \& \ (Y_n \leq 0), \\ Y_n & \text{при } (|X_n| > |Y_n|) \ \& \ (X_n > 0), \\ \frac{\pi}{2} + X_n & \text{при } (|X_n| \leq |Y_n|) \ \& \ (Y_n > 0), \\ \pi - Y_n & \text{при } (|X_n| > |Y_n|) \ \& \ (X_n \leq 0) \ \& \ (Y_n > 0). \end{cases}$$

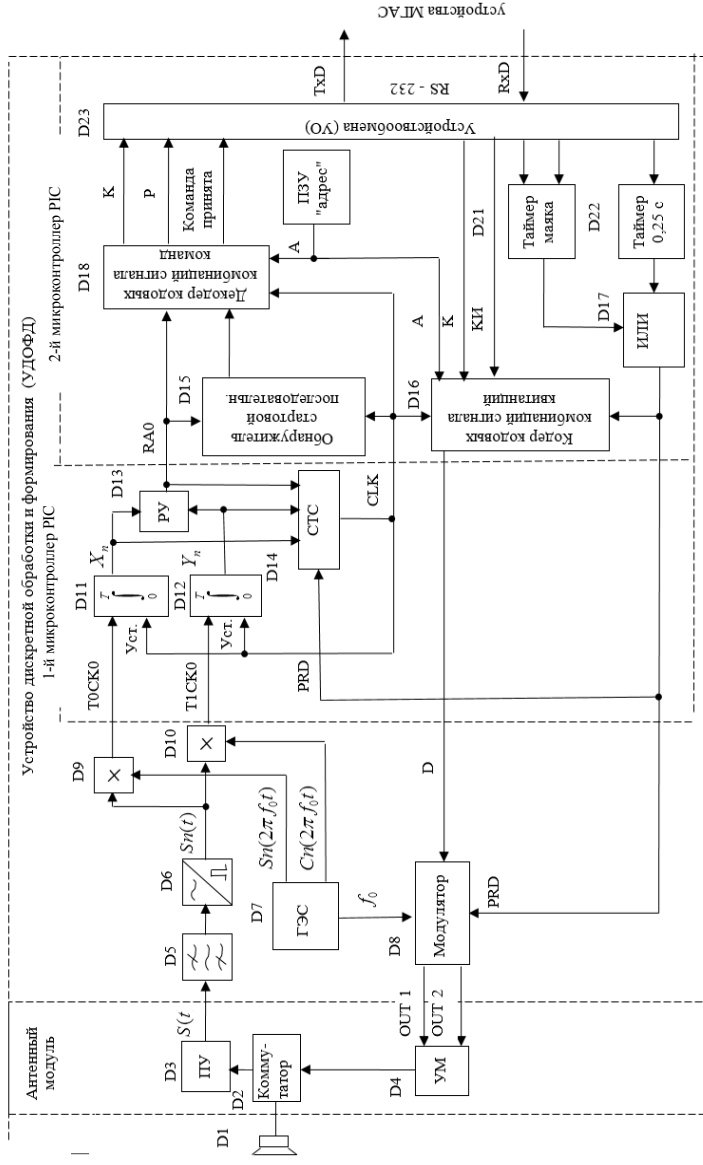


Рис. 4. Аппаратура гидроакустического канала связи. Донный модуль

Затем на основе вычисления разности фаз  $\Delta\Phi = \Phi_n - \Phi_{n-1}$  следующих друг за другом элементов сигнала в решающем устройстве выносятся решение о переданных информационных символах RA0.

Обработка сигналов в приемнике осуществляется с тактовой частотой 200 Гц, задаваемой выходными сигналами системы тактовой синхронизации (СТС) D14. СТС реализована по схеме цифровой системы фазовой автоподстройки частоты и фазы местного генератора на основе делителей частоты с переменным коэффициентом деления. Автоподстройка генератора осуществляется по принимаемому сигналу на основе анализа величин его проекций  $X_n$  и  $Y_n$  на квадратурные составляющие опорного сигнала и значений оценок принятых информационных символов RA0.

Выходной сигнал CLK системы тактовой синхронизации D14 подается во 2-й микроконтроллер PIC и используется в качестве синхронизирующего для декодирования последовательности принятых информационных символов RA0, поступающих из решающего устройства D13. Сигнал CLK системы тактовой синхронизации D14 также используется во 2-м микроконтроллере PIC для кодирования и формирования сигналов в режиме передачи. При этом для повышения стабильности частоты выходного сигнала системы тактовой синхронизации D14 сигналом PRD блокируется контур автоподстройки СТС.

Как уже отмечалось, основным (наиболее продолжительным) режимом работы донного модуля ГАКС является режим приема (ожидания вызова). При этом информационные символы RA0 с выхода решающего устройства D13 подаются во 2-й микроконтроллер PIC, на обнаружитель стартовой последовательности D15, который реализован по схеме 32-разрядного дешифратора.

При обнаружении стартовой последовательности следующие за ней 32 символа кодовой комбинации циклического кода (32, 16) подаются в декодер кодовых комбинаций команд D18.

В декодере кодовых комбинаций команд D18 происходит сравнение первых четырех символов кодовой комбинации циклического кода (32, 16) с адресом МГАС (с ее номером в двоичной форме), который задается ПЗУ – «адрес» D20. Если эти четыре символа совпадают с адресом МГАС, то в декодере кодовых комбинаций сигнала команд управления D18 начинается декодирование кодовой комбинации циклического кода (32, 16). Если при декодировании 32 символов кодовой комбинации циклического кода (32, 16) обнаруживается ошибка, то приемник переводится в режим обнаружения стартовой последовательности.

При отсутствии ошибок в комбинации циклического кода (32, 16) на устройство обмена (VO) D23 подаются 5-разрядный номер принятой команды

управления  $K$  и порядковый номер  $p$  принятой кодовой комбинации в сигнале команды управления. Их выдача сопровождается формированием сигнала «команда принята», по которому из УО D23 через промежуток времени после приема команды управления, задаваемый согласно выражению (1), она подается на исполнение на устройства МГАС (сигнал TxD). Начинается исполнение команды управления, одновременно включается таймер контроля времени исполнения команды управления D22.

По истечении промежутка времени длительностью 250 мс после подачи команды управления на исполнение донный модуль аппаратуры ГАКС переходит в режим передачи сигнала квитанции.

По сигналу от таймера D22 в кодере кодовых комбинаций сигнала квитанции D16 формируется кодовая последовательность сигнала квитанции, которая поступает на модулятор D8. В модуляторе D8 формируется последовательность отсчетов сигнала ОФМ со средней частотой  $f_0 = 29,6$  кГц, которые в виде двух последовательностей прямоугольных импульсов OUT1 и OUT2, соответствующих положительным и отрицательным полупериодам сигнала ОФМ, поступают в антенный модуль, на двухтактный ключевой усилитель (УМ) D4 и далее через коммутатор D2 на гидроакустическую антенну D1. В антенне D1 на основе ее резонансных свойств осуществляется восстановление формы сигнала ОФМ и его излучение в канал.

Если в течение промежутка времени длительностью 250 мс после принятия команды управления не зафиксировано подтверждение исполнения команды (отсутствует сигнал КИ «команда исполнена» от УО D23), то 14-му символу информационной части кодовых комбинаций циклического кода (32, 16) сигнала квитанции присваивается значение лог. 1.

При получении на донном модуле команды № 31 непосредственно после завершения передачи шести кодовых комбинаций сигнала квитанции передается тестовый блок длиной 2072 символа, формирование которого осуществляется в кодере D16.

Как уже указывалось, по команде № 25 донный модуль МГАС переводится в режим гидроакустического маяка. В этом режиме периодически один раз в 30 с по сигналу от таймера маяка D21 из донной станции передается сигнал гидроакустического маяка. Выключение гидроакустического маяка осуществляется по команде № 26.

Структурная схема бортового модуля ГАКС приведена на рис. 5. В составе бортового модуля аппаратуры ГАКС, так же как и в донной, можно условно выделить гидроакустическую антенну D1, антенный модуль, устройство формирования и обработки бортового модуля (УДОФБ) и оптический изолятор (ОИ).

Устройство и работа гидроакустической антенны D1, антенного модуля, устройства дискретной обработки и формирования бортового модуля аппаратуры ГАКС полностью совпадают с устройством и работой соответствующих устройств донного модуля ГАКС. Отличие донной и судовой частей аппаратуры заключается в узлах, программно реализованных на 2-м микроконтроллере PIC. Отличие состоит в том, что все управление донным модулем ГАКС осуществляется от встроенного 2-го микроконтроллера PIC, а в бортовом модуле – от ЭВМ судовой приемообработывающей аппаратуры. На встроенном в бортовой модуль аппаратуры 2-м микроконтроллере PIC реализуются операции кодирования кодовых комбинаций сигнала управления, декодирование кодовых комбинаций сигнала квитанций, измерения интервала времени между окончанием передачи с судна команды управления и моментом приема соответствующей квитанции, а также операции обмена сигналами между бортовым модулем и ЭВМ СПОА по последовательному каналу (RS-232) с гальванической развязкой типа «токовая петля».

Основным (наиболее продолжительным) режимом работы бортового модуля ГАКС является режим приема. Ее перевод в режим передачи осуществляется при поступлении из ЭВМ СПОА номера (адреса) вызываемой донной станции А и номера передаваемой на нее команды управления К. Соответствующие сигналы из блока сопряжения с ЭВМ D19 подаются в кодер кодовых комбинаций сигнала команд управления D16.

В блоке сопряжения с ЭВМ D19 формируется сигнал PRD (передача), по которому в кодере D16 генерируются шесть кодовых комбинаций сигнала команды управления, который излучается в направлении донной станции. В момент окончания передачи сигнала команды управления включается счетчик интервала времени D19, измеряющий продолжительность интервала времени  $\Delta T$  от момента передачи сигнала команды управления до момента получения соответствующей квитанции; полученное значение интервала  $\Delta T$  используется в ЭВМ СПОА для расчета наклонной дальности до МГАС.

После завершения передачи сигнала команды управления бортовой модуль ГАКС переходит в режим приема. Последовательность символов из канала обрабатывается приемником и с выхода решающего устройства D13 поступает в обнаружитель стартовой последовательности D15, который, так же как и в донном модуле, реализован по схеме 32-разрядного дешифратора. При обнаружении стартовой последовательности следующие за ней 32 символа кодовой комбинации циклического кода (32, 16) подаются на декодер кодовых комбинаций сигнала квитанций D17. Начинается декодирование комбинации циклического кода. Если при декодировании 32 символов кодовой комбинации циклического кода (32, 16) обнаруживается ошибка, то приемник переводится в режим обнаружения стартовой последовательности.

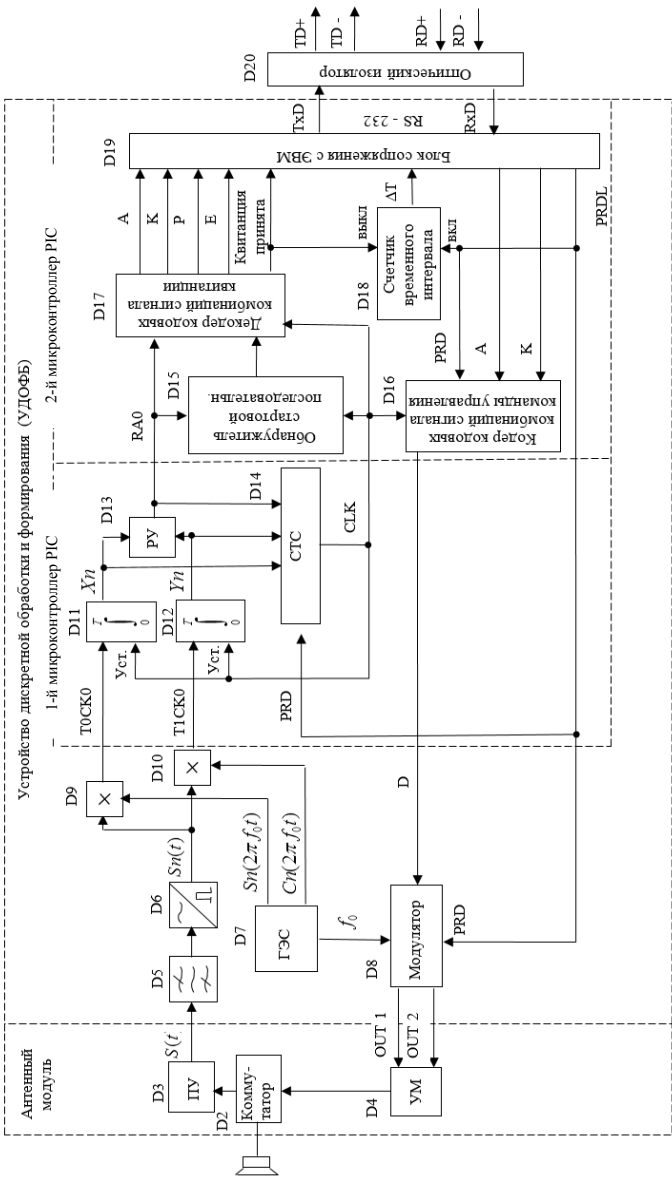


Рис. 5. Аппаратура гидроакустического канала связи. Бортовой модуль



При отсутствии ошибок в комбинации циклического кода (32, 16) 16 информационных символов циклического кода, содержащие четырехразрядный адрес  $A$  ответившей донной станции, номер  $K$  принятой на ней команды управления, порядковый номер  $P$  принятой кодовой комбинации в сигнале квитанции, а также служебный символ  $E$ , подаются на блок сопряжения с ЭВМ. Выдача этих сигналов сопровождается сигналом «квитанция принята», которым останавливается счетчик интервала времени  $D18$ . Его состояние вместе с указанными выше 16 информационными символами через блок сопряжения  $D20$  по последовательному каналу через оптический изолятор  $D20$  подается в ЭВМ СПОА.

Если принятая квитанция сопровождается блоком тестовой информации, то он вслед за 16 информационными символами и состоянием счетчика интервала времени  $\Delta T$  также подается в ЭВМ СПОА.

Выделенные из принятой квитанции адрес (номер МГАС), номер принятой на МГАС команды управления, а также рассчитанное значение наклонной дальности отображаются на экране монитора.

## **ВЫВОДЫ**

Выбор построения аппаратуры ГАКС осуществлены исходя из характеристик назначения по критерию минимума объема оборудования и потребления энергии донной частью аппаратуры ГАКС, размещаемой в корпусе донной станции.

В этой связи предложено осуществлять обмен сигналами между судном и АДС в полудуплексном режиме, так как в этом случае часть устройств, размещаемых в корпусе донной станции, могут поочередно работать в режимах приема и передачи. Предложено для обмена сигналами использовать двоичные сигналы, передаваемые методом относительной фазовой модуляции со скоростью 200 Бод. Для приема указанных сигналов применить цифровой корреляционный приемник с глубоким ограничением сигнала на входе, что позволяет упростить процедуру вхождения в связь, сократить длительность сеансов связи и, как следствие, уменьшить потребление от автономного источника питания автономной донной станцией (АДС).

Обмен сигналами судна с донными станциями, входящими в сеть, рекомендуется осуществлять в поочередном режиме на одной общей рабочей частоте с использованием кодового разделения сигналов между АДС.

Исходя из количества АДС, объединенных в сеть, количества команд управления, передаваемых на каждую из донных станций, из предельных значений вероятностей приема на АДС команды управления с необнаруженной

ошибкой и вероятности набора команды управления из шумов выбран ансамбль сигналов для передачи сигналов команд управления и квитанций. В качестве сигналов команд управления и квитанций выбраны двоичные последовательности, представляющие собой следующие друг за другом без перерыва шесть пронумерованных пар, каждая из которых состоит из стартовой синхронизирующей последовательности и кодовой комбинации циклического кода (32, 16).

Применение подобных сигналов позволяет:

- организовать на одной рабочей частоте работу судна в сети с количеством АДС не более 15;
- передавать с судна на каждую из АДС до 15 команд управления;
- получать на судне квитанции о приеме и исполнении на АДС команд управления;
- передавать на судно из АДС по запросу цифровую формулярную информацию;
- переводить АДС по команде на работу в режиме гидроакустического маяка с передачей из нее сигнала, содержащего идентификатор донной станции;
- осуществлять определение наклонной дальности между судном и АДС при любом обмене сигналами между ними.

Все предложенные технические решения ориентированы на применение цифровой микросхемотехники, в первую очередь 8-разрядных цифровых микроконтроллеров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криволапов Г.И., Чернецкий Г.А.* Новое поколение аппаратуры гидроакустической связи и управления для морских сейсмических и гидрофизических измерений // Вторая всесоюзная конференция по морской сейсмологии и сейсмометрии, 14–16 мая 1991: тезисы докладов. – М., 1991. – С. 138.
2. *Варакин Л.Е., Рябов Е.А.* Оптимизация стартстопной асинхронной системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Труды учебных институтов связи. Теория передачи сигналов по каналам связи. – Л., 1979. – С. 3–11.
3. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 78–84.

4. Филиппов Б.И. Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 3. – С. 67–77.

5. Справочник по гидроакустике / А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, А.П. Ляликов и др. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.

6. *Bluen S., Heard G.J., Pecknold S.* Autonomy and networking challenges of future underwater systems // 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). – Piscataway, NJ: IEEE, 2015. – P. 1514–1519.

7. Федосов В.П., Легин А.А., Ломакина А.В. Алгоритмы, основанные на технологии ММО–OFDM, для реализации цифрового гидроакустического канала связи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 148–158.

8. Литвинцева А.В., Оболонин М.А. Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3.

9. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel / K.G. Kekal, V.K. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Petroccia // Gyroscopy Andnavigation. – 2016. – Vol. 7, N 4. – P. 343–352.

10. *Khan A.I.R., Gang Q., Mehboob K.* Investigation of channel modeling and simulation of OFDM based communication near northern regions of Arabian sea // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 1169–1182.

11. Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide attenuation and ambient noise / J. Huang, M. Babeau, S. Blouin, C. Hamm, N. Taillefer // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 2017. – Vol. 2. – P. 1–21.

12. Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А. Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления в гидроакустических каналах связи // Известия ВолГГТУ. – 2015. – № 3 (161). – С. 69–72. – (Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь; вып. 11).

13. Филиппов Б.И. Протокол обмена сигналами в сети гидроакустических донных автономных станций // Известия ВолГГТУ. – 2015. – № 11 (176). – С. 104–111. – (Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь; вып. 12).

14. Филиппов Б.И. Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 55. – С. 33–40.

15. *Филиппов Б.И.* Передача телеметрической информации по гидроакустическому каналу связи // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 9. – С. 658–663.

16. *Филиппов Б.И.* Алгоритм функционирования системы измерения дистанции с использованием гидроакустического канала связи // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 4. – С. 87–98.

17. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Принципы аппаратурной реализации системы измерения дальности в гидроакустических каналах // Радиотехника. – 2017. – № 3. – С. 40–49.

**Филлипов Борис Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – радиотехника и связь, теория надежности сложных и вычислительных систем. Опубликовано 46 статей, два учебных пособия и монография. E-mail: [filippov-boris@rambler.ru](mailto:filippov-boris@rambler.ru)

**Спириянин Вячеслав Анатольевич**, студент Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [spiryenin.v@gmail.com](mailto:spiryenin.v@gmail.com)

## **Design and Description of hardware structure of hydroacoustic communication channel\***

**B.I. Filippov<sup>1</sup>, V.A. Spiryenin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk State Technical University, Docent, Candidate of Technical Sciences. E-mail: [filippov-boris@rambler.ru](mailto:filippov-boris@rambler.ru)

<sup>2</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk State Technical University. E-mail: [8King.of.light@mail.ru](mailto:8King.of.light@mail.ru)

This paper deals with the development of the hydroacoustic communication channel equipment (HCCE). HCCE is a multiple access two-way communication system in which the ship serves as the central station and underwater stations are subscribers. The system should be controlled from the central station, from the ship. The principles of signal exchange between the ship and autonomous underwater stations (AUS) are appropriate to be chosen based on the desired quality (fidelity) of information transmission while minimizing the amount of equipment in AUS and power consumption rating of this equipment from autonomous power supplies. Another issue that determines the complexity of the HCCE is the choice of signal division scheme between subscribers (AUS). Half-duplex system is proposed to be used for the

---

\* Received 08 October 2017.

communication between the ship and subscribers because in this case some devices in the underwater station can alternate between receiving and transmitting information. Binary signals and differential phase shift keying with the speed of 200 baud are proposed. To receive the signals, the digital correlation receiver with the deep level of input signal restriction is suggested. This simplifies connection setup and reduces session time as well as power consumption rate from autonomous power supply of AUS. Binary sequences consisting of six numbered pairs are chosen as signals of control and receipt instructions. Each pair consists of an initial synchronization sequence and a cyclic code sequence (32, 16). The application of these signals makes it possible to organize a network consisting of the ship and up to 15 AUS on a single operational frequency; send up to 15 control instructions from the ship to each AUS; gain receipts of operational instructions reception and execution; send digital logbook information to the ship upon request; turn AUS in the sonar beacon mode by sending a signal with AUS identifier; estimate the slant range between the ship and AUS during any exchange between them.

All proposed technical solutions are oriented towards digital microcircuitry, primarily 8-bit digital microcontrollers.

**Key words:** hydroacoustic channel, hydroacoustic communication channel equipment, multiple access communication system, autonomous underwater stations, central ship station, differential phase shift keying, control instructions signals, initial synchronization sequences, digital microcontrollers

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-97-127

## REFERENCES

1. Krivolapov G.I., Chernetsky G.A. [A new generation of equipment for hydroacoustic communication and control for marine seismic and hydrophysical measurements]. *Vtoraya vsesoyuznaya konferentsiya po morskoi seismologii i seismometrii* [Second All-Union conference on marine seismology and seismometry], May 14–16, 1991, Moscow: abstracts, p. 138.

2. Varakin L.E., Ryabov E.A. Optimizatsiya startstopnoi asinkhronnoi sistemy peredachi informatsii s shumopodobnymi signalami [Optimization of the start-stop asynchronous information transmission system with noise-like signals]. *Trudy uchebnykh institutov svyazi. Teoriya peredachi signalov po kanalam svyazi* [Proceedings of training institutes of communication. Theory of signal transmission through communication channels]. Leningrad, 1979, pp. 3–11.

3. Filippov B.I., Chernetskii G.A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [The analysis of statistical characteristics of signals and hindrances in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 3, pp. 78–84.

4. Filippov B.I. Energeticheskii raschet gidroakusticheskikh linii svyazi [Energy calculation of hydroacoustic communication lines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 67–77.
5. Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E., Lyalikov A.P. et al. *Spravochnik po gidroakustike* [Reference on hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 344 p.
6. Bluen S., Heard G.J., Pecknold S. Autonomy and networking challenges of future underwater systems. *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. Piscataway, NJ, IEEE, 2015, pp. 1514–1519.
7. Fedosov V.P., Legin A.A., Lomakina A.V. Algoritmy, osnovannye na tekhnologii MIMO–OFDM, dlya realizatsii tsifrovogo gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskije nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 7 (168), pp. 148–158.
8. Litvintseva A.V., Obolonin M.A. Ispol'zovanie lineinogo predskazatelya rechi v programmnoi modeli nizkoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Linear prediction of speech in software model of low speed vocoder over hydroacoustic communication channel]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 3.
9. Kekal K.G., Kebkal V.K., Kebkal A.G., Petroccia R. Experimental estimation of delivery success of navigation data packages transmitted via digital hydroacoustic communication channel. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 343–352.
10. Khan A.I.R., Gang Q., Mehboob K. Investigation of channel modeling and simulation of OFDM based communication near northern regions of Arabian sea. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 5 (4), pp. 1169–1182.
11. Huang J., Babeau M., Blouin S., Hamm C., Taillefer N. Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide attenuation and ambient noise. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2017, vol. 2, pp. 1–21.
12. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Vybora ansamblya signalov dlya peredachi komand upravleniya v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Choice of ensemble of signals for transfer of teams management in the hydroacoustic communication

channels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 3 (161), pp. 69–72.

13. Filippov B.I. Protokol obmena signalami v seti gidroakusticheskikh donnykh avtonomnykh stantsii [The protocol of an exchange of signals in a network of hydroacoustic ground autonomous stations]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2015, no. 11 (176), pp. 104–111.

14. Filippov B.I. Opredelenie naklonnoi dal'nosti mezhdru sudnom i donnoi stantsiei [Determination of the inclined range between the vessel and the bottom station]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2016, no. 55, pp. 33–40.

15. Filippov B.I. Peredacha telemetricheskoi informatsii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Transmission of telemetry information in a hydroacoustic communication channels]. *Informatsionnye tekhnologii – Information technologies*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 658–663.

16. Filippov B.I. Algoritm funktsionirovaniya sistemy izmereniya distantsii s ispol'zovaniem gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithm for the functioning of a distance measuring system using a hydroacoustic communication channel]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016. no. 4, pp. 87–98.

17. Filippov B.I., Chernetsky G.A. Printsipy apparaturnoi realizatsii sistemy izmereniya dal'nosti v gidroakusticheskikh kanalakh [Principles of hardware implementation measurement system range in the hydroacoustic channel]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2017, no. 3, pp. 40–49.

Для цитирования:

Филиппов Б.И., Спирыанин В.А. Описание и обоснование структурной схемы аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 97–127.

For citation:

Filippov B.I., Spiryanin V.A. Opisaniye i obosnovaniye strukturnoi skhemy apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Design and description of hardware structure of hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 97–127.

## СООБЩЕНИЯ

УДК 004.492.3

### **ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ\***

К.А. ДОНСКОЙ<sup>1</sup>, Л.С. ЛЕВИН<sup>2</sup>, Е.В. ПОПАНТОНОПУЛО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры защиты информации. E-mail: kirdon96@mail.ru

<sup>2</sup> 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры защиты информации. E-mail: mynameislev@bk.ru

<sup>3</sup> 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры защиты информации. E-mail: pev@atlas-nsk.ru

Данная работа затрагивает проблемы организации информационной безопасности применительно к сфере Интернета вещей. В работе рассматриваются определение Интернета вещей, сформировавшаяся архитектура, используемые технологии реализации, возможные угрозы безопасности и концепция безопасности. Задачей нашей работы является выявление проблем создания защищенной системы в сфере Интернета вещей и пути устранения данных проблем. Проанализировав архитектуру Интернета вещей, обращаем внимание на используемые технологии: сети, операционные системы, техническое исполнение, каналы связи, методы обработки данных, протоколы передачи информации, находим уязвимые места, приводим примеры сценариев атак на устройства семейства Интернета вещей. Исходя из обнаруженных уязвимостей анализируем набор средств и методов обеспечения информационной безопасности и подбираем решения, соответствующие требованиям Интернета вещей. Также мы рассматриваем применение уже существующих технологий и решения компаний лидеров разработки информационных технологий, таких как Cisco. Множество используемых уровней системы Интернета вещей и различия в технологиях не позволяют использовать для защиты единую модель безопасности, поэтому компания Cisco предлагает разграничивать решения безопасности по четырем уровням архитектуры и объединить методы защиты информации в так называемую среду безопасности. Подробное рассмотрение готовых решений и подходов к обеспечению безопасности в сфере Интернета вещей показывает необходимость в разработке стандарта для построения систем Интернета вещей, который бы сузил перечень используемых компонент и технологий, позволив построить единую модель безопасности Интернета вещей, соответствующую концепции безопасности.

---

\* Статья получена 29 июля 2017 г.



**Ключевые слова:** Интернет, мониторинг, информация, технологии, угрозы, защита, сеть, атаки, канал, архитектура, сценарии, система, безопасность, управление, контроль

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-128-143

## **ВВЕДЕНИЕ**

IoT (Интернет вещей) – это сеть связанных через Интернет объектов, способных собирать данные и обмениваться данными, поступающими со встроенных сервисов.

Отдел стандартов связи МСЭ (Международный союз электросвязи – International Telecommunication Union) опубликовал Рекомендацию Y.2060, озаглавленную «Обзор Интернета вещей» (Overview of the Internet of Things). В этом документе содержатся следующие определения, описывающие охват IoT.

Интернет вещей (IoT) – глобальная инфраструктура для информационного общества, которая обеспечивает возможность предоставления более сложных услуг путем соединения друг с другом (физических и виртуальных) вещей на основе существующих и развивающихся функционально совместимых информационно-коммуникационных технологий.

Вещь – предмет физического мира (физические вещи) или информационного мира (виртуальные вещи), который может быть идентифицирован и интегрирован в сети связи.

Устройство – элемент оборудования, который обладает обязательными возможностями связи и дополнительными возможностями измерения, срабатывания, а также ввода, хранения и обработки данных.

Интернет вещей состоит из слабо связанных между собой разрозненных сетей, каждая из которых была развернута для решения своих специфических задач. В офисных и жилых зданиях устанавливается множество сетей для управления отоплением, вентиляцией, кондиционированием, телефонной связью, безопасностью, освещением. По мере развития Интернета вещей эти и многие другие сети будут подключаться друг к другу и приобретать все более широкие возможности в сфере безопасности, аналитики и управления (рис. 1). В результате Интернет вещей приобретет еще больше возможностей открыть человечеству новые, более широкие перспективы.

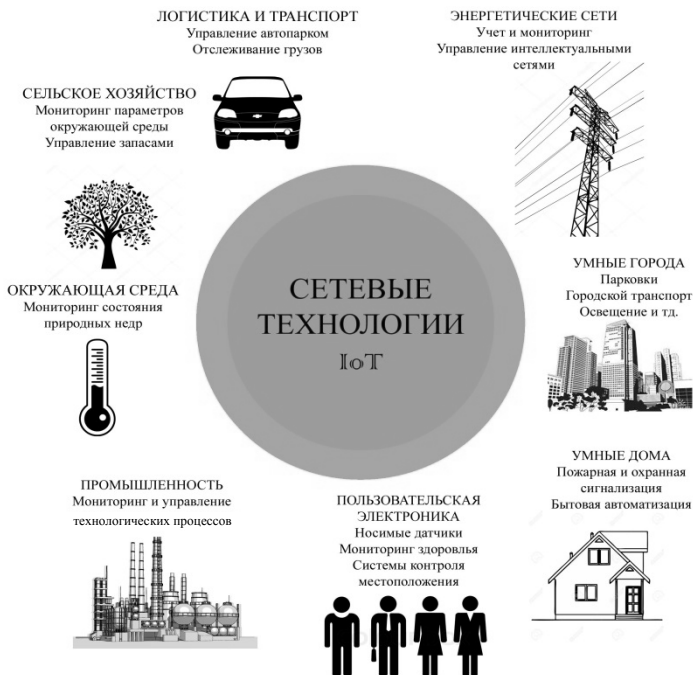


Рис. 1. Разнообразие областей применения

## 1. АРХИТЕКТУРА IoT

Архитектура IoT состоит из четырех уровней:

- устройства,
- связь,
- обработка,
- управление данными.

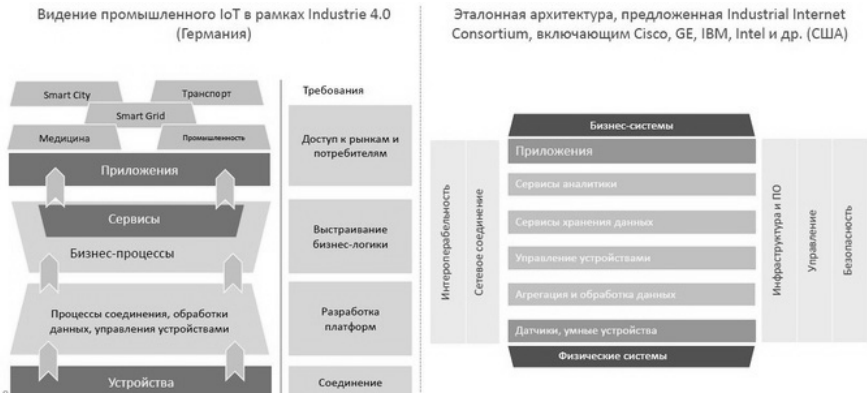


Рис. 2. Эталонные модели Германии, США



Рис. 3. Эталонная модель Всемирного форума IoT

## 2. УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИОТ

Слабые места IoT:

- стандартные учетные записи от производителя, слабая аутентификация;
- отсутствие поддержки со стороны производителя для устранения уязвимостей;

- трудно или невозможно обновить ПО и ОС;
- использование текстовых протоколов и ненужных открытых портов;
- используя слабость одного гаджета, хакеру легко попасть во всю сеть;
- использование незащищённых мобильных технологий;
- использование незащищённой облачной инфраструктуры;
- использование небезопасного ПО.

### **Пример угроз для частных лиц**

Если говорить про системы автоматизации для частных лиц, то из описанного выше наиболее важными представляются вопросы обеспечения контроля доступа к системе, безопасных коммуникаций между ее элементами, а также устойчивости к атакам. При этом по финансовыми причинам часто приходится идти на компромисс между стоимостью оборудования и уровнем защиты. К сожалению, адекватно оценить риски, особенно если речь идет о системах жизнеобеспечения дома, в данном случае очень сложно.

Дополнительно стоит отметить желательность использования надежных каналов связи и резервных линий коммуникаций, гибкие возможности системы при работе в автономном режиме, а также обеспечение конфиденциальности. Еще одним вопросом, который, к сожалению, редко решается производителями массового оборудования, является мониторинг работы, анализ и уведомления о нештатных ситуациях.

Конфиденциальность личных данных сегодня часто обсуждается в применении ко многим областям, но, пожалуй, именно в современных гаджетах и носимой электронике проблема защиты персональных данных особенно актуальна. В частности, подавляющее большинство фитнес-трекеров работают совместно с собственными облачными сервисами для хранения и обработки данных, и пользователям необходимо соглашаться с многостраничными документами условий использования сервисов, если они хотят воспользоваться данным устройством.

### **Примеры угроз для бизнеса**

IoT встречается не только в частном секторе, но и в множестве коммерческих областей, включая транспорт, системы автоматизации, мониторинг окружающей среды и медицину. В каждой из них потребители могут встретиться с уникальными угрозами. Например, отслеживание транспорта может раскрыть бизнес-стратегии компании, а неверные показания датчиков могут привести к аварии и порче дорогостоящего оборудования.



Рис. 4. Сценарии хакерских атак на IoT

В общем случае схема системы с использованием IoT состоит из конечных устройств, опциональных шлюзов, сети и вычислительных центров. Если предположить, что в существующей инфраструктуре серверов и основных коммуникаций уже реализованы все необходимые технологии (в частности, для корпоративных сетей и баз данных), то для IoT необходимо задуматься о стратегии защиты конечных точек, шлюзов и их коммуникаций. Конечные точки чаще всего работают в условиях ограниченных ресурсов, включая вычислительные мощности, объемы памяти и энергопотребление. Для них может быть очень сложно или даже невозможно использовать такие технологии, как выделенные чипы безопасности, контроль привилегий, защиту памяти или виртуализацию. Кроме того, недостаток ресурсов может приводить к слабой устойчивости к атакам, направленным на отказ в обслуживании. Вопрос дополнительно усложняется тем, что все чаще устройства основаны на собственных достаточно сложных микроконтролле-

рах и поддерживают удаленное обновление встроенного программного обеспечения. Так что встают задачи по обеспечению контроля корректности работающего на устройствах кода. В качестве одного из вариантов здесь предлагаются системы обеспечения доверенной среды исполнения, основанные на аппаратно-программных решениях.

Предлагаемый некоторыми компаниями дополнительный уровень в виде локальных шлюзов в определенных ситуациях может способствовать повышению уровня безопасности. В этом случае конечные устройства не подключены непосредственно к сети, а общаются исключительно с мостом, что позволяет упростить защиту их локальных коммуникаций. При этом шлюз, обладая существенно большими вычислительными ресурсами, уже способен реализовать традиционные технологии защиты коммуникаций при обмене данными с вычислительным центром.

Когда речь заходит о безопасных коммуникациях, стоит учитывать такой немаловажный фактор, как удобство использования. Очень желательно обеспечивать установку связей без сложной ручной настройки, но при этом не в ущерб уровню защиты, согласованно с политиками безопасности и под контролем системы управления ИТ. Для решения этой задачи можно предложить современные протоколы для аутентификации и шифрования трафика, требующие адаптации для повышения эффективности работы на платформах IoT. Отметим, что при подготовке программного обеспечения iRidium данным вопросам было уделено особое внимание. В частности, для связи панелей и серверов между собой используются защищенные протоколы.

При этом решение должно корректно обрабатывать и нештатные ситуации (например, потерю связи). Учитывая все большее распространение специализированных алгоритмов и аналитики, здесь важно обеспечить корректность и согласованность получаемых данных. Кроме двух описанных выше вопросов есть и еще один, возможно, не менее важный. Речь идет о жизненном цикле продуктов. Технологии обеспечения безопасности необходимы на всех этапах, начиная от разработки и создания и заканчивая утилизацией.

Основные инструменты безопасности, необходимые для защиты IoT:

- идентификация и аутентификация;
- защита технических каналов связи;
- сертификация с использованием шифрования;
- репликация и защита баз данных;
- контроль процесса релизов и изменений;
- использование средств доверенной загрузки;
- встроенная верификация платформы;

- контроль жизненного цикла системы;
- аудит безопасности.

Для бизнес-сегмента ключевым моментом будет удобное и эффективное отслеживание всех устройств в системе, мониторинг их состояния и диагностика. Администратор должен контролировать, в частности, такие вопросы, как установленное на устройствах программное обеспечение и его конфигурация. Решение должно учитывать следующие особенности: масштабируемость для использования в системе сотен, тысяч и более устройств; установка конечных точек в удаленных неконтролируемых местах; обеспечение требуемого уровня доступности и физической безопасности.

### **3. КОНЦЕПЦИЯ ЗАЩИТЫ IoT**

#### **Безопасность связи**

Канал связи должен быть защищен, для этого применяются технологии шифрования и проверки подлинности, чтобы устройства знали, могут ли они доверять удаленной системе. Новые криптографические технологии, такие как ECC (EllipticCurveCryptography), работают в десять раз лучше предшественников в слабomощных чипах IoT 8-bit 8MHz. Не менее важной задачей здесь является управление ключами для проверки подлинности данных и достоверности каналов их получения. Ведущие центры сертификации (CA) уже построили «сертификаты устройств» в более чем миллиард устройств IoT, предоставив возможность выполнять проверку подлинности широкого спектра устройств, включая сотовые базовые станции, телевизоры и многое другое.

#### **Защита устройств**

Защита устройств – это в первую очередь обеспечение безопасности и целостности программного кода. Тема безопасности кода выходит за рамки этой статьи, заострим внимание на целостности. Подписание кода требуется для подтверждения правомерности его запуска, также необходима защита во время выполнения кода, чтобы атакующие не перезаписали его во время загрузки. Подписание кода криптографически гарантирует, что он не был взломан после подписания и безопасен для устройства. Это может быть реализовано на уровнях приложений и рабочей платформы (прошивки) и даже на устройствах с монолитным образом прошивки. Все критически важные устройства, будь то датчики, контроллеры или что-то еще, должны быть настроены на запуск только подписанного кода. Устройства должны быть

защищены и на последующих этапах, уже после запуска кода. Здесь поможет защита на основе хоста, которая обеспечивает повышение защищенности, разграничение доступа к системным ресурсам и файлам, контроль подключений, защиту от вторжений, защиту на основе поведения и репутации. Также в этот длинный список возможностей хостовой защиты входят блокирование, протоколирование и оповещение для различных операционных систем IoT. В последнее время многие средства хостовой защиты были адаптированы для IoT и теперь хорошо проработаны и отлажены, не требуют доступа к облаку и бережно расходуют вычислительные ресурсы IoT-устройств.

### **Контроль устройств**

К сожалению, уязвимости в устройствах IoT все равно будут, их нужно будет исправлять, и это может происходить в течение длительного времени после передачи оборудования потребителю. Даже код с применением обфускации в критичных системах в конце концов реконструируется, и злоумышленники находят в нем уязвимости. Никто не хочет, а зачастую и не может отправлять своих сотрудников для очного визита к каждому устройству IoT для обновления прошивки, особенно если речь идет, например, о парке грузовиков или о сети датчиков контроля, распределенных на сотни километров. По этой причине «управляемость по воздуху» (over-the-air – OTA) должна быть встроена в устройства до того, как они попадут к покупателям.

### **Контроль взаимодействий в сети**

Некоторые угрозы смогут преодолеть любые предпринятые меры независимо от того, насколько хорошо все защищено. Поэтому крайне важно иметь возможности аналитики безопасности в IoT. Системы для аналитики безопасности помогут вам лучше понять вашу сеть, заметить подозрительные, опасные или злонамеренные аномалии.

## **4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ИОТ**

Компания CiscoSystems играет ведущую роль в разработке модели Всемирного форума IoT, разработала фреймворк безопасности IoT, ставший полезным дополнением к эталонной модели Всемирного форума IoT. На рис. 5 показана среда безопасности, связанная с логической структурой IoT.



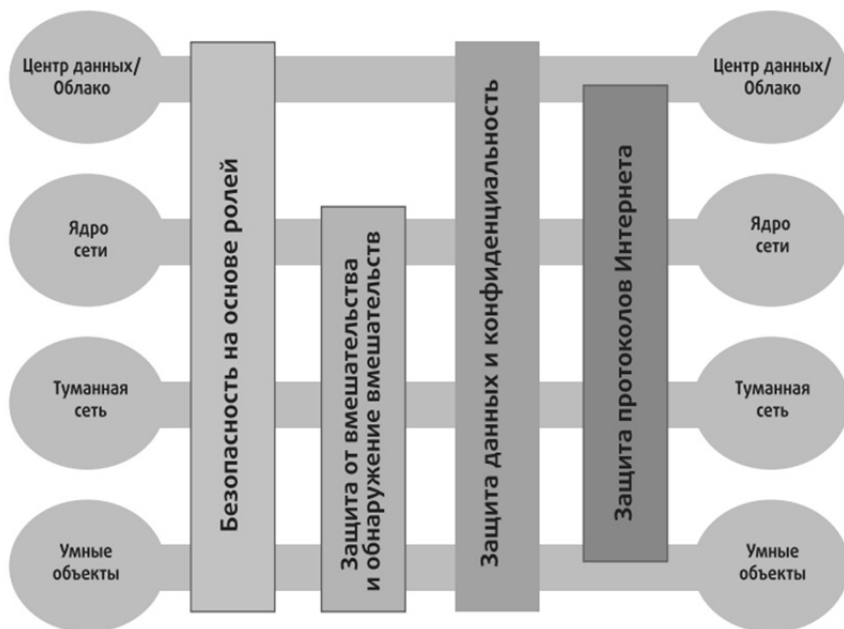


Рис. 5. Среда безопасности IoT

С помощью этой четырехуровневой архитектуры модель Cisco определяет четыре общие возможности безопасности, охватывающие несколько уровней.

- **Безопасность на основе ролей:** системы управления доступом на основе ролей (Role-Based Access Control – RBAC) назначают права доступа ролям, а не отдельным пользователям. Пользователям, в свою очередь, предписывают различные роли либо статически, либо динамически соответственно обязанностям. RBAC широко используется в коммерческих облачных и корпоративных системах. Этот инструмент, понятный администраторам, может использоваться для управления доступом к IoT-устройствам и генерируемым ими данным.

- **Защита от вмешательства и обнаружение вмешательств** – эта функция особенно важна на уровне устройств и туманной сети, но распространяется также и на уровень ядра сети. Все эти уровни могут использовать компоненты, физически находящиеся вне физически охраняемой территории предприятия.

- **Защита данных и конфиденциальность** – эти функции охватывают все уровни архитектуры.

- Защита протоколов Интернета – защита «данных в движении» от подслушивания и перехвата, важна для всех уровней.

На рис. 5 отмечены конкретные функциональные области безопасности поверх четырех уровней модели IoT. Перечислим четыре компонента безопасности.

- Аутентификация – охватывает элементы, иницирующие доступ, и первым делом идентифицирует устройства IoT. В отличие от типичных корпоративных сетевых устройств, для которых идентификация может осуществляться по идентификационным признакам человека (таким как имя/пароль или бейдж), оконечные устройства IoT должны оснащаться такими методами аутентификации, которые не требуют вмешательства человека. К таким методам относятся радиочастотные метки, сертификаты x.509 или MAC-адреса оконечных устройств.

- Авторизация – управляет доступом к устройству через структуру сети. Этот элемент включает в себя контроль доступа. Вместе с уровнем аутентификации он вырабатывает необходимые параметры для того, чтобы разрешить обмен информацией между устройствами и между устройствами и прикладными платформами, тем самым обеспечивая работу IoT-служб.

- Сетевая политика – охватывает все элементы, осуществляющие маршрутизацию и транспортировку трафика с оконечных устройств по инфраструктуре, будь то контроль, управление или собственно трафик данных.

- Аналитика безопасности, включая видимость и контроль – все функции, необходимые для централизованного управления устройствами IoT. В первую очередь видимость IoT-устройств, означающая то, что центральные функции управления безопасно оповещены о парке распределенных устройств IoT, включая идентичность и атрибуты каждого устройства. На основе такой видимости возникает способность осуществлять контроль, включая конфигурацию, патчи и обновления, а также контрмеры для пресечения угроз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интернет вещей – это пока еще новая область развития информационных технологий, и вопросы защиты информации здесь наиболее актуальны. Исходя из архитектуры, технологий и концепции безопасности мы делаем вывод, что добиться безопасности в сфере IoT единообразно невозможно из-за большого расхождения в реализации каналов связи, платформ и методов обработки данных в конкретных продуктах. Для решения вопросов защиты информации Интернета вещей необходимо привести стандарт разработки систем в

данном направлении. В данный момент каждое решение требует индивидуального подхода обеспечения безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная безопасность интернета вещей (Internet of Things) [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: [\(http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9\\_\(Internet\\_of\\_Things\)\)](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_(Internet_of_Things)) (дата обращения: 12.11.2017).
2. Что такое интернет вещей Internet of Things, IoT [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: [\(http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D1%82%D0%BE\\_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5\\_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82\\_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9\\_\(Internet\\_of\\_Things,\\_IoT\)\)](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_(Internet_of_Things,_IoT)) (дата обращения: 12.11.2017).
3. Еще один взгляд на безопасность Интернета вещей [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://geektimes.ru/company/iridiummobile/blog/267760/> (дата обращения: 12.11.2017).
4. Интернет вещей: сетевая архитектура и архитектура безопасности [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://internetinside.ru/internet-veshhey-setevaya-arkhitektura-i/> (дата обращения: 12.11.2017).
5. Эталонная архитектура безопасности интернета вещей (IoT). Ч. 1 [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://www.anti-malware.ru/practice/solutions/iot-the-reference-security-architecture-part-1> (дата обращения: 12.11.2017).
6. Сетевые технологии Интернета вещей [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: [https://habrahabr.ru/company/ericsson\\_ru/blog/301494/](https://habrahabr.ru/company/ericsson_ru/blog/301494/) (дата обращения: 12.11.2017).
7. Что такое IoT или интернет вещей? [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://coinspot.io/beginners/chto-takoe-iot-ili-internet-veshhej/> (дата обращения: 12.11.2017).
8. Новости интернета вещей [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://iot.ru/> (дата обращения: 12.11.2017).

9. Интернет вещей: как изменится вся наша жизнь на очередном витке развития Всемирной сети [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: [https://www.cisco.com/c/dam/global/ru\\_ru/assets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_iot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/ru_ru/assets/executives/pdf/internet_of_things_iot_ibsg_0411final.pdf) (дата обращения: 12.11.2017).
10. Что такое интернет вещей (Internet of Things, IoT) [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://edurobots.ru/2016/04/internet-veshhej/> (дата обращения: 12.11.2017).
11. «Интернет вещей» – реальность или перспектива? [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://compress.ru/Article.aspx?id=24290> (дата обращения: 12.11.2017).
12. Защита IoT-устройств и шлюзов [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/iot-trs-secure-iot-solutions1/index.html> (дата обращения: 12.11.2017).
13. Интернет вещей (IoT). Защита устройств и обязанность вендоров [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/aodugin/334725.php> (дата обращения: 12.11.2017).
14. Интернет вещи (iot) и их безопасность [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: [http://www.cleper.ru/articles/description.php?n=589\\_\\_](http://www.cleper.ru/articles/description.php?n=589__) (дата обращения: 12.11.2017).
15. IoT нуждается в информационной безопасности [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://www.comnews.ru/content/109250/2017-08-25/iot-nuzhdaetsya-v-informacionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 12.11.2017).

**Донской Кирилл Александрович**, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – современные системы информационной безопасности. E-mail: [kirdon96@mail.ru](mailto:kirdon96@mail.ru)

**Левин Лев Сергеевич**, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – современные системы информационной безопасности. E-mail: [mynameislev@bk.ru](mailto:mynameislev@bk.ru)

**Попантонопуло Евгений Владимирович**, аспирант кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – современные системы информационной безопасности. E-mail: [pev@atlas-nsk.ru](mailto:pev@atlas-nsk.ru).

## Information security of internet things \*

**K.A. Donskoy<sup>1</sup>, L.S. Levin<sup>2</sup>, E.V. Popantonopulo<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the information security department. E-mail: kirdon96@mail.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the information security department. E-mail: mynameislev@bk.ru

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630087, Russian Federation, postgraduate of the information security department. E-mail: pev@atlas-nsk.ru

This operation touches on issues of the organization of information security is applicable to the sphere of the Internet of things. In operation determination of the Internet of things, the created architecture, the used technologies of implementation, possible security risks and the concept of safety is considered. The task of our operation is detection of problems of creation of secure system in the sphere of the Internet of things and a way of elimination of these problems. Having analyzed architecture of the Internet of things, paying attention to the used technologies: networks, operating systems, workmanship, communication links, data handling methods, information transfer protocols, we find weak spots, we give examples of scenarios of the attacks to family devices the Internet of things. Proceeding from the found vulnerabilities, we analyze a set of means and methods of support of information security and we select the decisions conforming to requirements of the Internet of things. Also we consider use of already existing technologies and the decision of the companies of leaders of development of information technologies such as Cisco. The set of the used levels of system of the Internet of things and difference in technologies do not allow to use for protection uniform model of safety therefore the Cisco company suggests to differentiate solutions of safety on four levels of architecture and to integrate information security methods in the so-called environment of safety. Detailed reviewing of ready decisions and approaches to safety in the sphere of the Internet of things shows us need for development of the standard for creation of systems of the Internet of things which would narrow the list of the used components and technologies, having allowed to construct the uniform model of safety of the Internet of things corresponding to the concept of safety.

**Keywords:** internet, monitoring, information, technology, threats, protection, network, attacks, channel, architecture, scenarios, system, security, management, control

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-128-143

## REFERENCES

1. *Informatsionnaya bezopasnost' interneta veshchei (Internet of Things)* [Information security of the Internet of things (Internet of Things)]. 2017. Available at: [http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0)

---

\* Received 29 July 2017.

%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0\_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9\_ (Internet\_of\_Things) (accessed 11.12.2017).

2. *Chto takoe internet veshchei Internet of Things, IoT* [What is the Internet of things, IoT]. 2017. Available at: [3. \*Eshche odin vzglyad na bezopasnost' Interneta veshchei\* \[One more view of safety of the Internet of things\]. 2015. Available at: <https://geektimes.ru/company/iridiummobile/blog/267760/> \(accessed 11.12.2017\).](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_ (Internet_of_Things, _IoT) (accessed 11.12.2017).</a></p></div><div data-bbox=)

4. *Internet veshchei: setevaya arkhitektura i arkhitektura bezopasnosti* [Internet of things: network architecture and architecture of safety]. 2017. Available at: <http://internetinside.ru/internet-veshhey-setevaya-arkhitektura-i/> (accessed 11.12.2017).

5. *Etalonnaya arkhitektura bezopasnosti interneta veshchei (IoT)*. Ch. 1 [Reference architecture of safety of the Internet of prophetic (IoT). Pt. 1]. 2017. Available at: <https://www.anti-malware.ru/practice/solutions/iot-the-reference-security-architecture-part-1> (accessed 11.12.2017).

6. *Setevye tekhnologii Interneta veshchei* [Network technologies of the Internet of things]. 2017. Available at: [https://habrahabr.ru/company/ericsson\\_ru/blog/301494/](https://habrahabr.ru/company/ericsson_ru/blog/301494/) (accessed 11.12.2017).

7. *Chto takoe IoT ili internet veshchei?* [What is IoT or Internet of Things?]. 2017. Available at: <https://coinspot.io/beginners/chto-takoe-iot-ili-internet-veshhej/> (accessed 11.12.2017).

8. *Novosti interneta veshchei* [News of the Internet of things]. 2017. Available at: <https://iot.ru/> (accessed 11.12.2017).

9. *Internet veshchei: kak izmenitsya vsya nasha zhizn' na ocherednom vitke razvitiya Vsemirnoi seti* [Internet of things: How will our whole life change at the next round of development of the World Wide Web]. 2017. Available at: [https://www.cisco.com/c/dam/global/ru\\_ru/assets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_+\\_iot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/ru_ru/assets/executives/pdf/internet_of_things_+_iot_ibsg_0411final.pdf) (accessed 11.12.2017).

10. *Chto takoe internet veshchei (Internet of Things, IoT)* [What is the Internet of Things, IoT]. 2017. Available at: <http://edurobots.ru/2016/04/internet-veshhej/> (accessed 11.12.2017).

11. *"Internet veshchei" – real'nost' ili perspektiva?* ["Internet of things" – reality or perspective?]. 2017. Available at: <http://compress.ru/Article.aspx?id=24290> (accessed 11.12.2017).

12. *Zashchita IoT-ustroystv i shlyuzov* [Protection of IoT-devices and gateways]. 2017. Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/iot-trs-secure-iot-solutions1/index.html> (accessed 11.12.2017).

13. *Internet veshchei (IoT). Zashchita ustroystv i obyazannost' vendorov* [Internet of things (IoT). Device protection and vendor responsibility]. 2017. Available at: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/aodugin/334725.php> (accessed 11.12.2017).

14. *Internet veshchi (iot) i ikh bezopasnost'* [Internet of things (IoT) and their protection]. 2017. Available at: <http://www.cleper.ru/articles/description.php?n=589> (accessed 11.12.2017).

15. *IoT nuzhdaetsya v informatsionnoi bezopasnosti* [IoT needs information security]. 2017. Available at: <http://www.comnews.ru/content/109250/2017-08-25/iot-nuzhdaetsya-v-informacionnoy-bezopasnosti> (accessed 11.12.2017).

Для цитирования:

*Донской К.А., Левин Л.С., Попантопуло Е.В.* Информационная безопасность интернет вещей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 128–143.

For citation:

*Donskoy K.A., Levin L.S., Popantonopulo E.V.* Informatsionnaya bezopasnost' internet veshchei [Information security of internet things]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 128–143.

## **ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**

### **УСЛОВИЯ ПРИЕМА СТАТЕЙ**

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

1. Статья объемом 8–12 страниц от аспирантов и 16–22 страниц 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 в одну-две страницы в двух экземплярах.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

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