

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

**№3(27)**  
**2024**

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

---

ISSN 2658-4727

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И  
ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-  
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**  
**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Севастополь, 2024

Главный редактор  
**Филипович О.В.**, к.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
Заместитель главного  
редактора  
**Балакин А.И.**, к.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
Научный редактор  
**Бохонский А.И.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия  
**Вартанов М.В.**, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
**Греков Н.А.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)  
**Доронина Ю.В.**, д.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
**Жмудь В.А.**, д.т.н., доц.,  
(г. Новосибирск)  
**Краснодубец Л.А.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)  
**Моисеев Д.В.**, д.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
**Обжерин Ю.Е.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)  
**Осипов К.Н.**, д.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
**Песчанский А.И.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)  
**Петрешин Д.И.**, д.т.н., проф.  
(г. Брянск)  
**Прейс В.В.**, д.т.н., проф.  
(г. Тула)  
**Щенятский А.В.**, д.т.н., проф.  
(г. Севастополь)  
**Заморёнов М.В.**, к.т.н., доц  
(г. Севастополь)  
**Майстришин М.М.**, к.т.н., доц.  
(г. Севастополь)  
**Рапацкий Ю.Л.**, к.т.н., доц.  
(г. Севастополь)

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М.** Реализация электродвигателями 7  
конструируемых оптимальных управлений движением объектов  
**Филипович О.В.** Структура информационно-управляющей системы 17  
процессом селективной сборки

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Крамарь О.А., Димин М.Э., Тихонов Г.О.** Использование ортогональных 27  
последовательностей для обеспечения безопасным обменом данных между  
морскими робототехническими комплексами по оптическому каналу связи  
**Мирзоян Н.Ю., Заморёнов М.В., Заморёнов И.М.** Стохастическая 36  
модель оценки надежности электродвигателя с учетом диагностики износа  
подшипников  
**Моисеев Д.В., Севрюков И.Т., Ильин В.В., Козлов В.В.** Масштабные 45  
эффекты при моделировании неравновесных процессов  
**Бохонский А.И., Варминская Н.И., Майстришин М.М.** Замена 54  
кососимметричной функции управления эквивалентной аналитической  
**Крамарь В.А., Ермаков И.А.** Проектирование подводного 61  
роботизированного комплекса с использованием модельно-  
ориентированного подхода

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Токарев Д.А., Кудряшов А.В., Васильев Д.М., Тихонов Г.О.** Построение 73  
карты по данным с гидролокатора бокового обзора морского  
роботизированного комплекса  
**Ляшко А.Д., Дементьев К.В.** Метод коррекции времяпролетных датчиков 83  
по визуальным данным в задаче позиционирования каретки с двумя  
степенями свободы  
**Васютенко А.П., Балакина Н.А.** Рычажный пневматический 95  
преобразователь с двумя регулируемыми соплами

Подписной индекс научного журнала 85768 по интернет-каталогу «Пресса России».

Научный журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ производствами (технические науки);
  - 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды производствами (технические науки);
  - 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).
- Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

*Editor-in-Chief*

**Filipovich O.V.**, candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

*Deputy Editor-in-Chief*

**Balakin A.I.**, candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

*Scientific Editor*

**Bokhonsky A.I.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

*Editorial Board*

**Vartanov M.V.**, doctor of technical sciences, professor (Moscow)

**Grekov N.A.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

**Doronina Yu.V.**, doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

**Zhmud V.A.**, doctor of technical sciences, docent (Novosibirsk)

**Krasnodubets L.A.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

**Moiseev D.V.**, doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

**Obzherin Yu.E.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

**Osipov K.N.**, doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

**Peschanskiy A.I.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

**Petreshin D.I.**, doctor of technical sciences, professor (Bryansk)

**Preis V.V.**, doctor of technical sciences, professor (Tula)

**Schenyatsky A.V.**, doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

**Zamoryonov M.V.**, candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

**Maystrishin M.M.**, candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

**Rapatsky Yu.L.**, candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Bokhonsky A.I., Maystrishin M.M.** Implementation of constructed optimal motion controls by electric motors 7  
**Filipovich O.V.** Structure of information and control system for selective assembly process 17

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

- Kramar O.A., Dimin M.E., Tikhonov G.O.** Use of orthogonal sequences to ensure secure data transmission over optical communication channel 27  
**Mirzoyan N.Y., Zamoryonov M.V., Zamoryonov I.M.** Stochastic model for evaluating the reliability of an electric motor, taking into account the diagnosis of bearing wear 36  
**Moiseev D.V., Sevryukov I.T., Ilyin V.V., Kozlov V.V.** Large-scale effects in modeling nonequilibrium processes 45  
**Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Maystrishin M.M.** Replacing the oblique-symmetrical control function with an equivalent analytical 54  
**Kramar V.A., Ermakov I.A.** Designing an underwater robotic complex using a model-oriented approach 61

MEASURING INSTRUMENTS AND METHODS

- Tokarev D.A., Kudryashov A.V., Vasiliev D.M., Tihonov G.O.** Constructing a map based on data from a side-scan sonar of a marine robotic complex 73  
**Liashko A.D., Dementiev K.V.** The method for time-of-flight sensor correction based on visual data in the carriage positioning problem with two degrees of freedom 83  
**Vasyutenko A.P., Balakina N.A.** Lever pneumatic transducer with two adjustable nozzles 95

Subscription index of the scientific journal is 85768 according to the Internet catalogue "Press of Russia".

The scientific journal is included in the "List of peer-reviewed scientific editions, in which the main results of dissertations for the degree of Candidate of sciences, for the degree of Doctor of sciences should be published", approved by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, in the following scientific specialties:

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and software packages

2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment

2.3.3. Automation and control of technological processes and productions

Founder and publisher: FSAEI HE «Sevastopol State University» ul. Universitetskaya, 33. Sevastopol, 299053.

© FSAEI HE «Sevastopol State University»

© Authors of the articles

**ПАМЯТИ**  
**Вадима Яковлевича Коппа**

2 августа 2024 года ушел из жизни Вадим Яковлевич Копп, заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Политехнического института СевГУ.



Вся научно-педагогическая деятельность профессора Коппа В.Я. была связана с Севастопольским государственным университетом, который он окончил в 1972 г. по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения», получив квалификацию

«инженер-механик» (в те годы – Севастопольский приборостроительный институт, СПИ). Работая в промышленности города Севастополя, в 1977 г. без отрыва от производства окончил СПИ по специальности «Автоматика и телемеханика» с присвоением квалификации «инженер-электрик».

С 1976 г. по 2024 г. Копп В.Я. работал в университете старшим научным сотрудником, ассистентом, доцентом, профессором. Был с 1985 по 1990 гг. заместителем декана факультета технологии и автоматизации машино-приборостроения. С 1990 по 1994 гг. заведовал кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», а с 1995 г. по 2014 г. – кафедрой «Автоматизированные приборные системы» Севастопольского национального технического университета.

В 1983 году Копп В.Я. досрочно окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию, в 1988 г. ему присвоено ученое звание доцента по кафедре автоматизации и комплексной механизации СПИ. После защиты докторской диссертации в 1993 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре автоматизации технологических процессов и производств.

В течение всего периода работы в университете Копп В.Я. активно занимался научными исследованиями в области построения математических моделей сложных автоматизированных систем. С 1989 г. он успешно руководил четырнадцатью госбюджетными и хоздоговорными научно-исследовательскими работами, результаты которых внедрены на предприятиях и в проектных организациях.

За период работы в университете Копп В.Я. создал официально зарегистрированную в университете научную школу «Моделирование автоматизированных технических систем», получившую широкое признание в России, Украине, Германии, Польше и других странах. Научная деятельность, проводимая им и его учениками, велась одновременно по нескольким направлениям: моделирование автоматизированных производственных систем, управляемая сборка, информационный подход к анализу измерительных систем. С 1996 г. успешно осуществлял руководство аспирантурой и докторантурой, подготовил четырех докторов и одиннадцать кандидатов технических наук, большинство из которых ведут научную и преподавательскую деятельность в ВУЗах Российской Федерации.

Вадим Яковлевич являлся одним из ведущих ученых СевГУ, с 1993 г. активно работал в специализированных Советах по защите кандидатских и докторских диссертаций. Среди наиболее значимых публикаций – шесть монографий, всего опубликовал более 400 научных работ, в том числе 32 изобретения. В.Я. Копп был главным редактором научного журнала «Автоматизация и измерения в машино-

приборостроении» и председателем Организационного комитета международной научно-технической конференции «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения».

За достигнутые результаты в научно-педагогической деятельности награжден грамотой Кабинета Министров Украины, в 2008 году ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины». В 2019 году он был лауреатом общенациональной премии «Профессор года» по Южному и Северо-Кавказскому федеральному округу.

Вадим Яковлевич отличался исключительной чуткостью к друзьям и коллегам.

*Ушел из жизни Человек,  
Которых немного бывает.  
В сердцах у нас память навек,  
Но как теперь Вас не хватает.*

Светлая память о Вадиме Яковлевиче останется навсегда в сердцах тех, кто имел с ним возможность работать, учиться и общаться.

**РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ КОНСТРУИРУЕМЫХ  
ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ**

Бохонский А.И.<sup>1</sup>, Майстришин М.М.<sup>2</sup>

**IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTED OPTIMAL MOTION  
CONTROLS BY ELECTRIC MOTORS**

Bokhonsky A.I.<sup>1</sup>, Maistrishin M.M.<sup>2</sup>

***Аннотация.** Исследованы модели оптимального управления переносных поступательных и вращательных движений объектов с использованием двигателей постоянного и переменного тока. Для управления (переносного ускорения) приняты реверсионно конструируемые управления, полученные на основании решения полной обратной задачи вариационного исчисления. Обращено внимание на необходимость строгой экспериментальной проверки снижения энергоемкости в случае применения обоснованных типов переносных управлений (линейных либо угловых ускорений).*

***Annotation.** Models of optimal control of portable translational and rotational movement of objects using direct and alternating current motors have been studied. For control (transferable acceleration), reverse-constructed controls are adopted, obtained on the basis of solving the complete inverse problem of the calculus of variations. Attention is drawn to the need for strict experimental verification of the reduction in energy intensity in the case of using reasonable types of portable controls (linear or angular accelerations).*

***Ключевые слова.** Реверсионное конструирование управлений, энергоемкость управлений, практическая реализация, применение электродвигателей.*

***Keywords.** Reversible control design, control energy intensity, practical implementation, application of electric motors.*

**Введение.**

В [1,2] приведены уравнения движения и регулирования кинематических параметров и момента электропривода. Оптимальному управлению электроприводами посвящены, например, работы [3,4,5]. В [6,7] вариационными методами решены задачи оптимального управления электроприводами постоянного тока с учетом сопротивления и ограничения на нагрев.

Оптимальное управление двигателями переменного тока усложняются по сравнению с двигателями постоянного тока нелинейной зависимостью вращающего момента двигателя от параметра скольжения и от частоты напряжения статорных обмоток. Поэтому усложняется практическая реализация оптимального управления напряжением статорных обмоток, при котором достигается цель оптимального переносного движения.

**Целью работы** является исследование модели оптимального управления переносных поступательных и вращательных движений объектов с использованием электродвигателей, а также возможность практической реализации предложенных оптимальных перемещений с учетом сопротивления и снижения энергии, затраченной на управление.

**Математическая модель мехатронного модуля с асинхронным двигателем.**

Уравнение асинхронного двигателя с учетом сопротивления принято в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - k_1 \omega, \quad (1)$$

где  $M$ ,  $M_c$  – активный момент двигателя и постоянный момент сопротивления, приведенные к валу двигателя;  $\omega$  – частота вращения ротора двигателя;  $J$  – момент инерции всех элементов системы, приведенный к валу двигателя.

Активный момент вычисляется по известной зависимости:

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}}}, \quad (2)$$

где  $M_{\kappa}$  и  $s_{\kappa}$  – критические значения момента и скольжения;  $s = \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0}$

– скольжение, в котором  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$  – синхронная частота;  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $f$  – частота напряжений статорных обмоток (управляемая величина).

Если в первом приближении пренебречь  $\frac{s}{s_{\kappa}}$ , то в общем случае в области малых моментов сопротивления следует упрощенная зависимость  $M = \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa}} \cdot s$ . Момент инерции, приведенный к валу двигателя,

$$J = J_{\partial} + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + \frac{mv^2}{2\omega^2},$$

где  $J_{\partial}$  – момент инерции вращающихся частей двигателя;  $J_1, J_2$  – моменты инерции шестерен передачи;  $i = \frac{D_2}{D_1}$  – передаточное число,  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры шестерен.

В (3) параметры вычисляются так:

$$J_1 = \frac{m_1 r_1^2}{2}; \quad r_1 = \frac{D_1}{2}; \quad m_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \cdot b \cdot \rho;$$

$$J_2 = \frac{m_2 r_2^2}{2}; \quad r_2 = \frac{D_2}{2}; \quad m_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot b \cdot \rho,$$

где  $m_1, m_2$  – массы шестерен;  $b$  – ширина шестерен;  $\rho$  – плотность материала шестерен. Линейная скорость каретки  $v = \frac{\omega \cdot h}{i \cdot 2\pi}$ , где  $h$  – шаг ходового винта.

Постоянный момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, равен

$$M_c = \frac{(F_{cm} + F_{mp})v}{\eta \cdot \omega},$$

где  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$  – коэффициент полезного действия передач системы;  $F_{cm}$  – сила сопротивления, приложенная к каретке;  $F_{mp} = f_{mp} \cdot mg$  – сила трения;  $f_{mp}$  – коэффициент трения скольжения.

### 1. Оптимальное переносное движение упругой системы.

Исследование переносных движений упругого объекта привело к оптимальному перемещению из исходного в конечное состояние покоя:

$$s_e = \frac{L}{2\pi}(p_1 t - \sin p_1 t),$$

где  $L$  – максимальное перемещение в переносном движении;  $p_1 = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  – общее время движения.

Переносные скорость и ускорение:

$$v_e = \frac{L p_1}{2\pi}(1 - \cos p_1 t), \quad a_e = \frac{L p_1^2}{2\pi} \sin p_1 t.$$

Управление для механической характеристики (2).

После подстановки (2) в (1) получены два корня для  $\omega_0$ , один из которых соответствует физическому смыслу. При некоторых численных исходных данных может появляться комплексное число, и при построении в вещественной области график будет терпеть разрыв.

Управление для упрощенной механической характеристики [1]:

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa}} s = \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa}} \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right). \quad (3)$$

После подстановки (3) в (1) следует для  $\omega_0$  единственное решение, т. е.

$$\omega_0 = \frac{2M_{\kappa}\omega}{s_{\kappa} \left( \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa}} - J \frac{d\omega}{dt} - M_c - k_1\omega \right)}.$$

График функции  $\omega_0 = \omega_0(t)$  не будет содержать разрывов и по физическому смыслу близок к графику в предыдущем случае.

Численные решения для обоих случаев выполнены при одинаковых исходных данных. Исходные данные:  $D_1 = 0,025$  м;  $D_2 = 0,05$  м;  $i = 2$ ;  $\eta_1 = 0,98$ ;  $\eta_2 = 0,8$ ;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $h = 0,005$  м;  $m = 1,5$  кг;  $f_{mp} = 0,2$ ;  $b = 0,005$  м;  $M_{\kappa} = 0,715$  Н·м;  $k_1 = 0,001$ ;  $k_2 = 0,001$ ;  $\phi_0 = \pi/2$ ;  $L = 0,3$  м;  $T_0 = 0,5$  с;  $p_1 = 2\pi/T_0$  с<sup>-1</sup>;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. На Рис.1 (для  $p = 4\pi$  с<sup>-1</sup>) показаны графики перемещения  $S_e(t)$ , скорости  $v_e(t)$ , ускорения  $a_e(t)$  каретки.

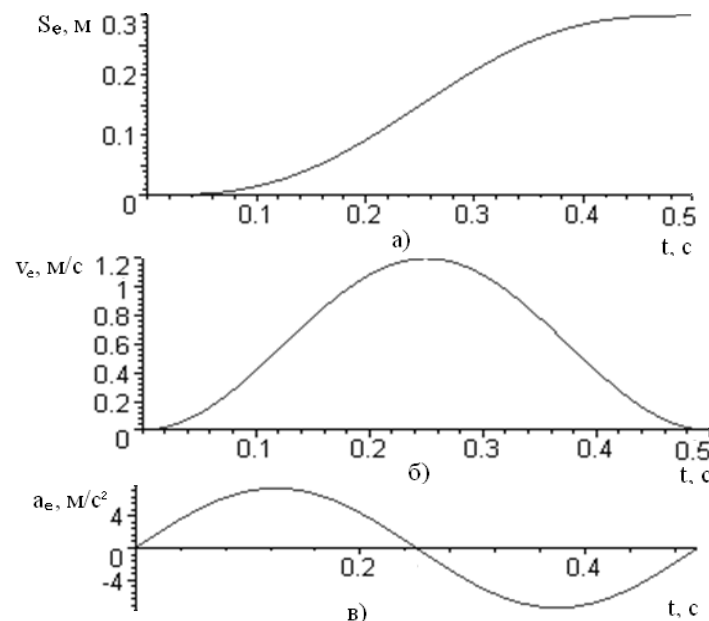


Рис.1 – Графики: а) перемещения,  $S_e(t)$ ; б) скорости,  $v_e(t)$ ; в) ускорения,  $a_e(t)$

Такой закон движения, как показано в [5], обеспечивает оптимальное транспортирование объекта с одной степенью свободы.

Из графиков (Рис.2) следует, что при использовании исходной зависимости  $M = M(\omega)$  без упрощения график имеет разрыв, т.е. на этом участке функция комплексная. В случае упрощенной характеристики исключается разрыв функции, и графики практически совпадают.

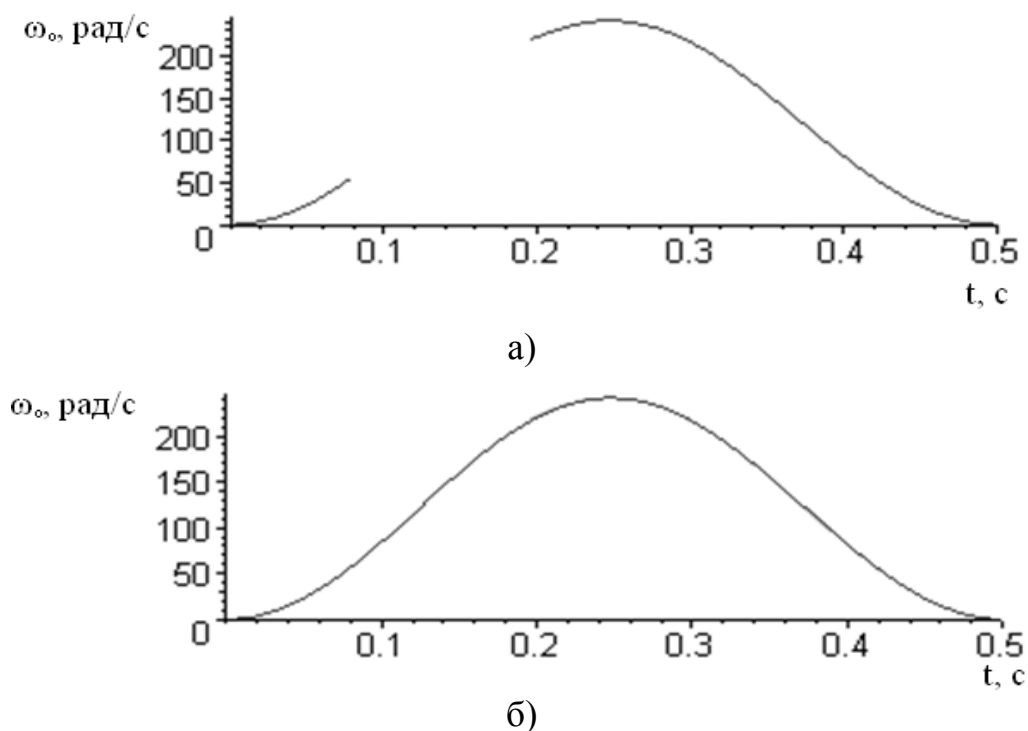


Рис.2 – Графики зависимостей: а)  $\omega_0(t)$  – без упрощения характеристики; б)  $\omega_0(t)$  – при упрощенной характеристике

## 2. Управление двигателем постоянного тока.

При автоматизации технологических процессов возникает задача повышения производительности с устранением колебаний элементов перемещаемой системы в точке позиционирования.

Управление напряжением якорной цепи двигателя постоянного тока, основывается на решении обратной задачи динамики. По заданному закону движения каретки необходимо найти управление  $U(t)$  при оптимальном перемещении каретки из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Схема двигателя показана на Рис.3.

Уравнение вращения якоря двигателя принято в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (4)$$

где  $M$ ,  $M_c$  – активный момент двигателя и момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $J$  – момент инерции всех элементов системы, приведенный к валу электродвигателя:

$$J = J_\partial + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + \frac{mh^2}{4i^2\pi^2},$$

где  $J_\partial$  – момент инерции вращающихся частей двигателя;  $J_1$ ,  $J_2$  – моменты инерции шестерен передачи;  $i$  – передаточное число;  $m$  – масса каретки;  $h$  – шаг ходового винта.

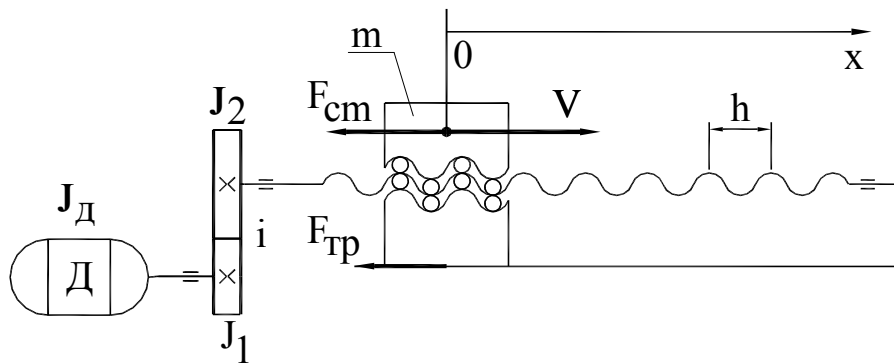


Рис.3 – Схема электропривода

Активный момент двигателя вычисляется так:

$$M = cI_\text{я}, \quad (5)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент определяемой конструкцией двигателя:

$$c = \frac{U_\text{н} - I_\text{ян} R_\text{я}}{\omega_\text{н}}, \quad (6)$$

где  $U_\text{н}$ ,  $I_\text{ян}$ ,  $\omega_\text{н}$  – номинальные значения напряжения, тока якоря и частоты вращения;  $R_\text{я}$  – сопротивление якорной цепи.

Момент сопротивления электродвигателя:

$$M_c = \frac{(F_\text{см} + F_\text{тр})h}{2\pi i \eta},$$

где  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$  – к.п.д. передач системы;  $F_\text{см}$  – сила сопротивления, приложенная к каретке;  $F_\text{тр} = f_\text{тр} mg$  – сила трения;  $f_\text{тр}$  – коэффициент трения.

Управляющее воздействие (напряжение):

$$U = E + R_{\text{ш}} I_{\text{ш}} + L_{\text{ш}} \frac{dI_{\text{ш}}}{dt},$$

где  $E = c\omega$  – э.д.с двигателя;  $I_{\text{я}}$  – ток якоря;  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи. Выражение для управления принимает вид:

$$U = \frac{R_{\text{я}}}{c} M_{\text{с}} + c\omega + \frac{R_{\text{я}} J}{c} \frac{d\omega}{dt} + \frac{L_{\text{я}} J}{c} \frac{d^2\omega}{dt^2}.$$

Из универсальных аналитических зависимостей для углового ускорения, угловой скорости и угла поворота при значении степенного полинома  $n = 3$  следуют выражения:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{10\varphi_*(T-2t)}{T^5}, \quad \omega_e(t) = \frac{10\varphi_* t}{T^5} (T^3 - 3T^2t + 4Tt^2 - 2t^3),$$

$$\varphi_e(t) = \frac{\varphi_* t^2}{T^5} (5t^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3),$$

где  $\varphi_e$  – максимальный угол поворота;  $T$  – общее время оптимального поворота.

При  $T = 1$  с,  $\varphi_* = \frac{\pi}{4}$  энергия, затраченная на управление:

$$A = 2J \int_0^T \varepsilon_e \omega_e dt = \frac{1,5625\varphi_*^2}{T^2} = 0,9638 \text{ Дж.}$$

Для реализации данного типа управления с использованием двигателя постоянного тока принято:  $U_{\text{н}} = 128$  В,  $I_{\text{ян}} = 4$  А,  $\omega_{\text{н}} = 28$  с<sup>-1</sup>,  $R_{\text{я}} = 20$  Ом.

С учетом сопротивления и уравнений (4), (5) и (6) ток якоря вычисляется так:

$$I_{\text{я}} = \frac{(J\varepsilon_e + M_{\text{с}} + k_1\omega_e)}{c},$$

где  $k_1$  – коэффициент линейно-вязкого сопротивления.

При  $J = 1$  кг·м<sup>2</sup>,  $M_{\text{с}} = 0$ ,  $k_1 = 0$  затрачиваемая энергия на реализацию оптимального управления двигателем постоянного тока равна:  $A = 2 \int_0^{T/2} I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} dt = 0,9595$  Дж.

Таким образом для реализации управления типа «разгон-торможение» двигателем постоянного тока с экономией энергии

необходимо с достаточной точностью задавать исходные параметры и обеспечивать необходимую характеристику тока якоря.

При учете линейно-вязкого сопротивления

$$M_c = M_c^* + k_1 \omega,$$

где  $k_1$  – коэффициент линейно-вязкого сопротивления.

Для известного закона движения каретки  $V = f(t)$  угловая скорость находится как

$$\omega(t) = \frac{2\pi i}{h} \cdot V(t).$$

Для электродвигателя постоянного тока при заданной скорости следует [3,4]:

$$V(t) = \frac{L}{2\pi} (1 - \cos pt).$$

В данном случае принято (Рис.4)

$$V(t) = 0,2(1 - \cos(6,2832t)).$$

Начальные условия для скорости: при  $t=0$ ,  $V(0)=0$ ; при  $t=1$  с,  $V(1)=0$ . На Рис.5 приведен график управления при ( $k_1=0$ ). Напряжение является нелинейной функцией с изменением знака. На управления  $U(t)$  влияют физические параметры электродвигателя.

При учете линейно-вязкого сопротивления ( $k_1 \neq 0$ ) напряжение не меняет знак (Рис.6), но существенно возрастает его максимальное значение.

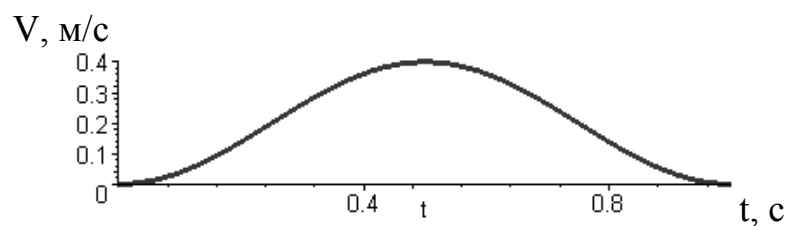


Рис.4 – График изменения скорости

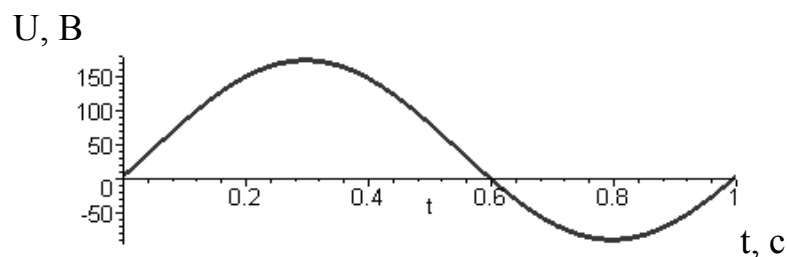


Рис.5 – График напряжения без учета линейно-вязкого сопротивления

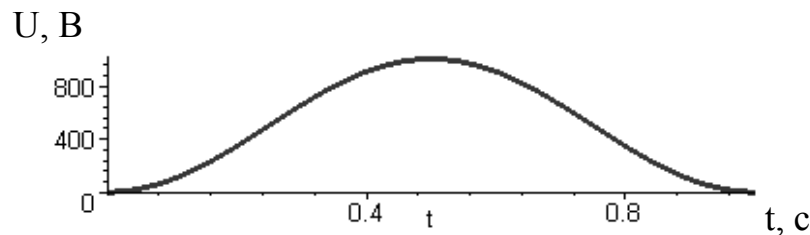


Рис.6 – График изменения напряжения с учетом линейно-вязкого сопротивления ( $k_1 = 0,1$ )

### **Заключение.**

Необходима практическая реализация реверсионно конструируемых оптимальных управлений, обеспечивающих достижение цели переносного поступательного и вращательного движений объекта с минимальным энергетическим принуждением при использовании электродвигателей постоянного тока. Предполагается реализация новых моделей, отражающих действительные свойства электрических машин с контролем расхода энергии по измерениям механических и электрических переменных.

Главной целью экспериментальных исследований является определение потребляемой энергии на реализацию целенаправленных движений с использованием менее энергоемких управлений.

### **Библиографический список**

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для ВУЗов /В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
2. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. /Ю.П. Петров. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
3. Петров Ю. П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с.
4. Олейников, В.А. Основы оптимального и экстремального управления / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин. – Москва: Высшая школа, 1969. – 296 с.
5. Абдулаев Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдуллаев, Ю.П. Петров. Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
6. Майстришин М.М. Влияние сопротивления на оптимальное перемещение объекта / М.М. Майстришин // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2013. Вып.14. – С. 179-183.
7. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические предложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

<sup>1</sup>*Бохонский Александр Иванович, д-р. техн. наук, проф., профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., директор колледжа, mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Maystrishin Mikhail Mikhaylovich, candidate of technical sciences, associate professor, college director, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССОМ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ

Филипович О.В.<sup>1</sup>

## STRUCTURE OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR SELECTIVE ASSEMBLY PROCESS

Filipovich O.V.<sup>1</sup>

**Аннотация.** Рассматривается процесс однопараметрической селективной многоэлементной сборки. Приведена структура технологического процесса в виде многомерной системы с последовательно расположенными этапами. Показано, что для достижения заданной точности выходного параметра изделия необходимо учитывать взаимосвязь этапов, а комплексное управление технологическим процессом осуществлять информационно-управляющей системой (ИУС). Разработаны структурные схемы ИУС отдельной единицы основного технологического оборудования, применяемого при изготовлении элементов, а также сборочного процесса в целом. Приведено описание функционального назначения каждого из блоков системы и ее характеристик.

**Annotation.** The process of single-parameter selective multi-element assembly is considered. The structure of the technological process in the form of a multidimensional system with sequentially arranged stages is given. It is shown that in order to achieve a given accuracy of the output parameter of the product it is necessary to take into account the interrelation of the stages, and the complex control of the technological process is carried out by the information and control system (ICS). Structural schemes of the ICS of a separate unit of the main technological equipment used in the manufacture of elements, as well as the assembly process as a whole are developed. The functional purpose of each of the system's units and its characteristics are described.

**Ключевые слова.** Селективная сборка, информационно-управляющая система, структура.

**Keywords.** Selective assembly, information and control system, structure.

### Введение.

Известно, что технологический процесс однопараметрической селективной сборки  $m$  элементов состоит из нескольких взаимосвязанных операций или этапов [1]:

1. Измерение. Исходные данные – измеряемые параметры как

физические величины, а также их точность. Это определяет выбор средств измерительной техники и методик выполнения измерений;

2. Сортировка. Исходными данными являются результаты предыдущего этапа, а также величины расширенных и групповых допусков, границы селективных групп и их количество. Каждый элемент соотносится с одной конкретной селективной группой. Этап может выполняться как с процессом накопления элементов в специальных устройствах, так и, в некоторых случаях, без него. В классических вариантах группы имеют отдельные накопители с заранее заданными номерами;

3. Комплектование. Исходные данные – уравнения комплектования, правила и последовательности образования сборочных комплектов. Выходным показателем этапа является сформированный сборочный комплект (СК) при наличии всех элементов, входящих в него;

4. Сборка. Является завершающим этапом, когда элементы, входящие в сформированный СК, соединяют в изделие путем применения определенных технологий (совмещение, фиксация, пайка и т.д.).

Структуру процесса можно представить как многомерную систему, в которой на вход каждого этапа поступают, а с выхода – снимаются определенные данные, при этом изменения происходят под действием технологических факторов. Взаимосвязь этапов проиллюстрирована Рис.1.

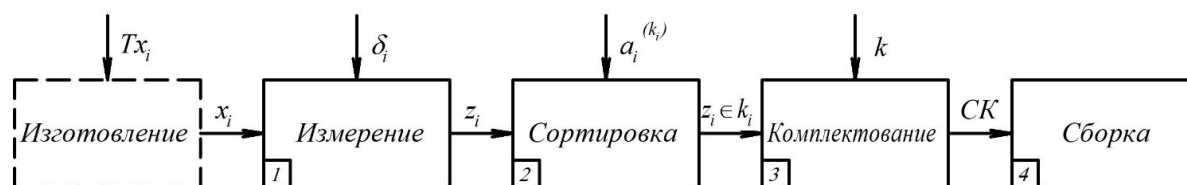


Рис.1 – Этапы процесса селективной сборки

На Рис.1 использованы следующие обозначения [2-4]:

- $x_i$  – истинное значение параметра элемента  $i$ , ( $i = \overline{1, m}$ );
- $Tx_i$  – расширенный допуск на изготовление параметра  $x_i$  элемента  $i$ ;
- $z_i$  – действительное значение параметра элемента  $i$ ;
- $\delta_i$  – случайная составляющая погрешности измерения параметра элемента  $i$ ;
- $k_i$  – номер селективной группы;
- $a_i^{(k_i)}$  – граница селективной группы  $k_i$  элемента  $i$ ;
- $k$  – тип сборочного комплекта.

Особенностью сборочного процесса является их последовательное выполнение, а также технологическое наследование, заключающееся в переносе свойств объектов от предшествующих этапов к последующим [5-7]. Наличие наследования обуславливает необходимость анализа взаимного влияния этапов, которые нельзя рассматривать изолированно друг от друга.

Для изделий, собираемых селективно, точность выходного параметра является важнейшим показателем и определяется совокупностью факторов, имеющих, в основном, случайную природу. Каждая производственная погрешность имеет в своем составе долю от изготовления материалов, их последующей обработки и сборки. Свойства изделий, выраженные через показатели качества, технологически наследуются от предшествующих операций к последующим, эффект наследования увеличивается с увеличением требований к точности.

Важным предварительным этапом, показанном на Рис.1 пунктирными линиями и предшествующем сборке, является изготовление, где формируются свойства собираемых в изделие элементов. Элементы, образующие СК, изготавливаются с различными степенями точности и всегда имеют наследственную информацию в виде отклонений своих параметров от номинальных значений. Это означает, что:

- все этапы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики собираемых изделий в целом формируются под взаимодействием всего комплекса выполняемых операций;

- качество изделия формируется на протяжении всей технологической предыстории, любое управляющее воздействие на условную «заготовку» изменяет показатели качества;

- для формирования заданных показателей качества целесообразно разработать информационно-управляющую систему, позволяющую осуществлять комплексное управление с учетом взаимосвязей между этапами.

**Целью работы** является разработка структурной схемы и основных принципов функционирования ИУС процесса многоэлементной однопараметрической селективной сборки.

### **Структура ИУС.**

Внедрение ИУС на базе использования современных средств вычислительной техники и математических методов является перспективным направлением совершенствования методов управления технологическими процессами. Под ИУС понимается система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления оборудованием или процессом

[8,9]. Вопросам их создания, функционирования и трансформации в киберфизические системы с использованием информационно-коммуникационных технологий посвящены работы [10-14].

Существует множество методов и моделей управления технологическим оборудованием, позволяющих создавать ИУС, различные по своей структуре и принципам функционирования. Одним из возможных вариантов реализации систем управления являются системы активного контроля, которые обеспечивают заданный уровень качества изделий непосредственно в процессе их изготовления. Здесь получаемая измерительная информация о величине и направлении изменения размеров позволяет оптимизировать технологический процесс, повысить точность путем компенсации погрешностей, совместить процессы обработки и измерения, тем самым повышая производительность труда. Основные принципы функционирования ИУС станков с применением активного контроля рассмотрены в [15,16].

Другой вариант реализации ИУС возможен при наличии стопроцентного послеоперационного контроля. Такие системы, например, можно реализовать для технологического оборудования, выполняющего финишные операции, перед последующим их селективным комплектованием и сборкой (Рис.2 [17]).

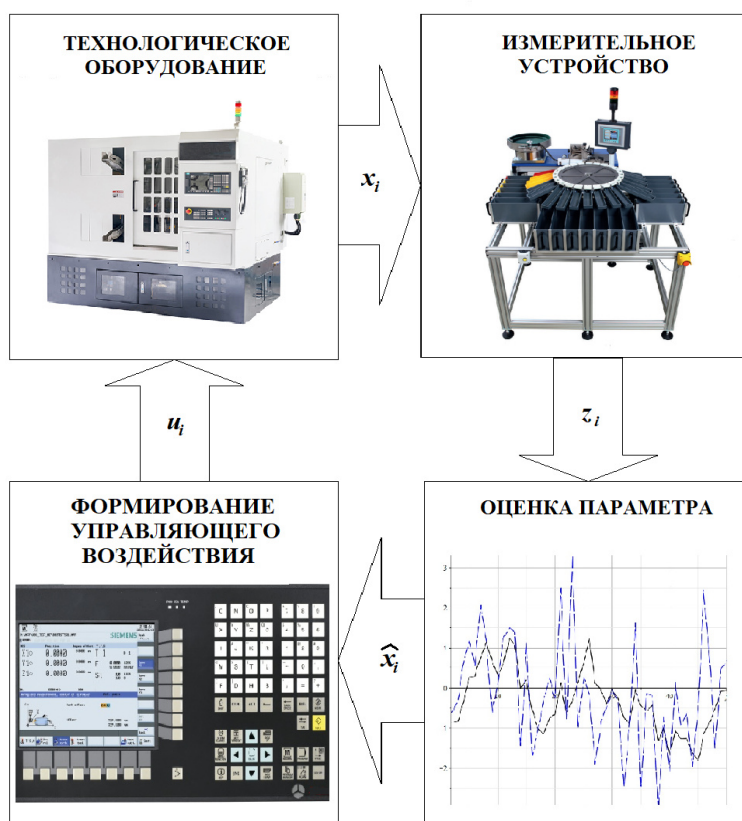


Рис.2 – ИУС технологического оборудования

В таких системах сигналы управления  $u$ , необходимые для регулирования величины параметра  $x$ , обычно формируются по результатам послеоперационных измерений по действительным значениям  $z$ . Одной из возможных задач, определяющих алгоритм функционирования ИУС, является получение оценки величины отклонения заданного параметра с наибольшей возможной точностью при наличии априорных данных, связанных с погрешностями обработки и измерения. Для решения задачи такой оценки в работах [18-20] применен рекуррентный алгоритм при описании исследуемого динамического процесса в пространстве состояний:

$$\begin{aligned}x_{i,j+1} &= x_{i,j} + \mu_{i,j} + \zeta_{i,j} + u_{i,j}, \\z_{i,j+1} &= x_{i,j+1} + \delta_{i,j+1},\end{aligned}$$

где  $x_{i,j+1}$  и  $x_{i,j}$  – значения параметров элементов  $i$ -го типа на  $(j+1)$ -м и  $j$ -м циклах технологического процесса соответственно;  $\mu_{i,j}$  – величина, определяющая эволюцию системы;  $\zeta_{i,j}$  и  $\delta_{i,j}$  – стационарные случайные величины;  $u_{i,j}$  – управляющее воздействие. Предположив, что случайные величины  $\zeta_{i,j}$  и  $\delta_{i,j}$  являются стационарными, независимыми и распределены по законам Гаусса с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_{\zeta i}^2$  и  $\sigma_{\delta i}^2$  соответственно, уравнение фильтра Калмана для такой системы при начальных условиях  $\hat{x}_{i,0} = 0$ ,  $\sigma_{\zeta 0}^2 = 0$  можно записать в виде [21]

$$\hat{x}_{i,j+1} = \hat{x}_{i,j} + \mu_{i,j} + u_{i,j} + K_{i,j+1} \left( z_{j+1} - \hat{x}_{i,j} - \mu_{i,j} - u_{i,j} \right), K_{i,j+1} = \frac{V_{i,j} + \sigma_{\zeta i}^2}{V_{i,j} + \sigma_{\zeta i}^2 + \sigma_{\delta i}^2},$$

где  $\hat{x}_{i,j+1}, \hat{x}_{i,j}$  – оценки величин  $x_{i,j+1}$  и  $x_{i,j}$ ;  $K_{i,k+1}$  – коэффициент усиления фильтра Калмана, оптимальное значение которого минимизирует среднее значение квадрата ошибки оценивания

$$V_{i,j+1} = M[\varepsilon_{i,j+1}^2] = \frac{\sigma_{\delta i}^2 (V_{i,j} + \sigma_{\zeta i}^2)}{V_{i,j} + \sigma_{\zeta i}^2 + \sigma_{\delta i}^2},$$

$M$  – символ математического ожидания;  $\varepsilon_{i,j+1}$  – ошибка оценивания,

$$\varepsilon_{i,j+1} = x_{i,j+1} - \hat{x}_{i,j+1}.$$

Структурная схема ИУС технологического процесса селективной сборки  $m$  элементов показана на Рис.3.

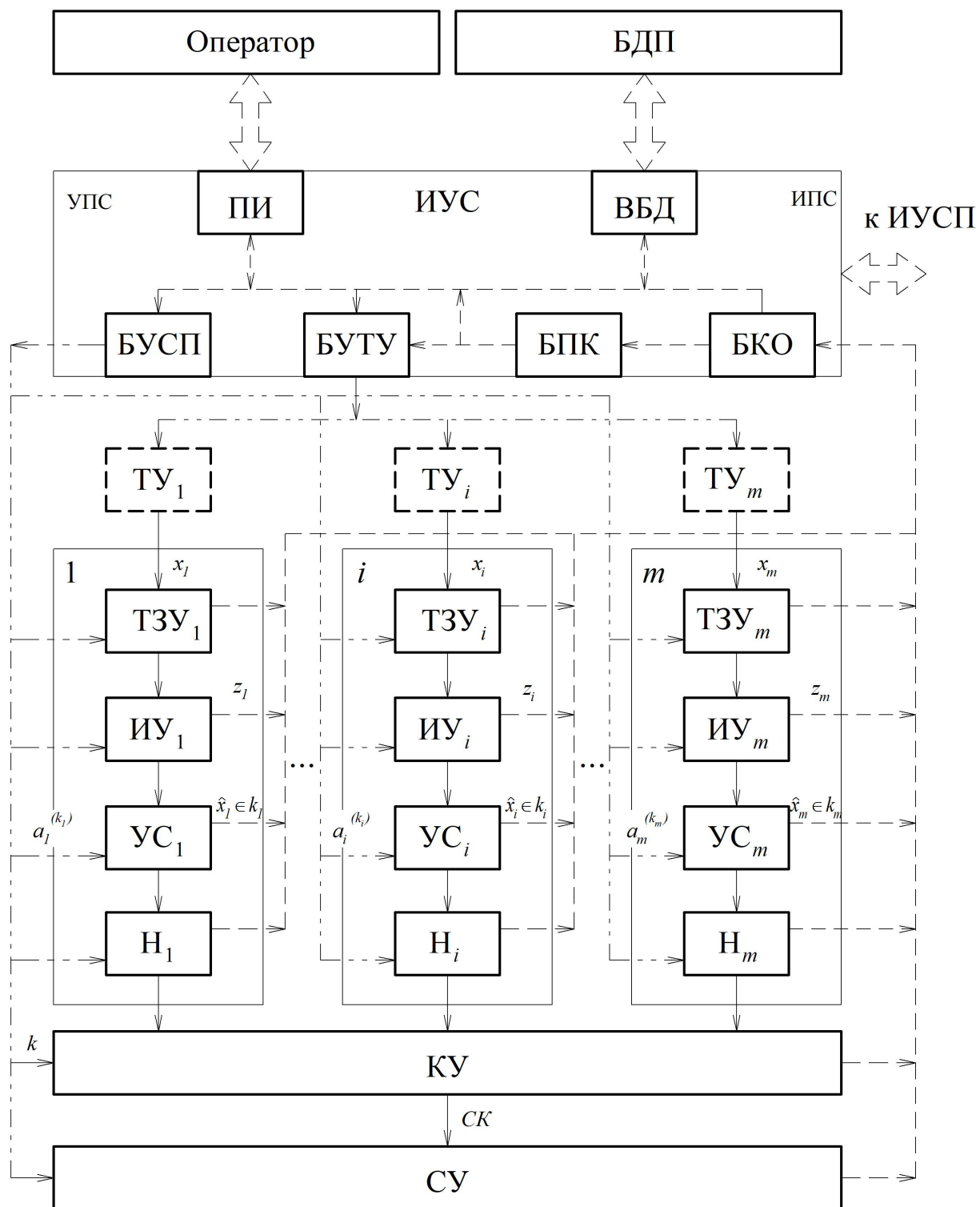


Рис.3 – Структура ИУС сборочного процесса:

———— материальные потоки; — · — управляющие команды;  
 - - - - - измерительная информация

Для рассматриваемого процесса материальные потоки организованы следующим образом. Элементы типа  $i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) из технологического устройства  $TU_i$ , выполняющего финишные операции процесса изготовления параметра  $x_i$ , поступают в загрузочное устройство  $TZU_i$ , которое их ориентирует, транспортирует и подает на позиции измерительного устройства  $IU_i$ . По результатам измерения становится известной информация о принадлежности параметра элемента определенной селективной группе, которая по результатам прогнозирования и коррекции одновременно с элементом попадает на устройство сортировки  $UC_i$ . По результатам сортировочного этапа элемент транспортируется в определенный канал накопительного устройства  $NU_i$ . По аналогии выполняются этапы с элементами других типов. Из накопителей элементы по заданному алгоритму комплектования поодиночке или группами перемещаются в комплектовочное устройство КУ, которое осуществляет формирование СК  $k$ -го типа с заданными характеристиками, собираемые сборочным устройством СУ.

Общее управление функционированием отдельными устройствами и технологическим процессом в целом осуществляет ИУС. Она условно разделена на две подсистемы: измерительную ИПС и управляющую УПС, отличающиеся направлением информационных потоков.

Информационно-управляющая система состоит из ряда блоков. ВБД – внутренняя база данных, предназначенная для хранения внутренних данных и результатов работы системы. ПИ – пользовательский интерфейс, обеспечивающий ввод данных оператором и вывод результатов функционирования системы. Блок контроля и отображения информации (БКО) представляет собой комплекс средств, обеспечивающий обработку и визуальное отображение информации о состоянии технологического оборудования и показателях технологического процесса. Основная задача БКО состоит в первичной обработке информации о значениях  $z_i$  с измерительных преобразователей ИУ и передаче ее в ВБД и блок прогнозирования и коррекции (БПК). Дополнительно блок имеет возможность отображения значений любых измеренных и расчетных параметров и показателей в удобном для оператора виде в режиме реального времени. БПК в свою очередь осуществляет вычисление оптимальной по заданному критерию оценки  $\hat{x}_i$ , коррекции управляющего воздействия  $u_i$  и подачу его на  $TU_i$  посредством блока управления технологическими устройствами (БУТУ). БУТУ во взаимосвязи с блоком управления сборочным процессом (БУСП) осуществляет управление всеми

этапами, при этом на этапе сортировки  $УС_i$  осуществляет селекцию по результатам вычисления значений оценок параметра  $\hat{x}_i$ .

### **Заключение.**

ИУС с предложенной схемой является открытой и имеет высокую степень интеграции с другими системами, что выражается во взаимосвязи как с информационно-управляющей системой предприятия (ИУСП), так и с базой данных предприятия (БДП). Она осуществляет полный контроль всех технологических этапов с возможностью мониторинга показателей сборочного процесса. Собранные в ВБД данные являются доступными для анализа и последующего использования, например, с целью идентификации распределений всех случайных величин, с которыми оперирует математическое, алгоритмическое и программное обеспечение. Автоматический сбор и обработка данных практически до нуля уменьшает вероятность появления субъективных погрешностей и значительно повышает качество продукции. Интеграция с другими системами позволит обеспечить более эффективное взаимодействие между производственными подразделениями.

ИУС, построенная по данному принципу, может использоваться для сбора, систематизации и обработки информации с целью оперативного управления процессом сборки узлов топливной и гидравлической аппаратуры, шатунно-поршневых групп двигателей внутреннего сгорания, подшипников качения и других прецизионных однопараметрических изделий, для сборки которых применяются селективные методы. В целом, структурная схема и ее реализация зависит от множества факторов, среди которых геометрические, электрические, механические и другие параметры элементов, их количество, способ образования выходного параметра, количество параметров каждого элемента и стратегии комплектования, технические характеристики отдельных подсистем и т.д.

### **Библиографический список**

1. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки /В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
2. Филипович О.В. Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий /О.В. Филипович, А.Г. Карлов, Н.А. Волошина //Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. – № 5. – С. 398-403.
3. Filipovich O. Simulation model of selective assembly of three elements /O. Filipovich //2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020), 2020. – P. 9271388. – DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271388.
4. Филипович О.В. Определение количества комплектов при селективной

- сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения /О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Волошина, В.О. Филипович //Сборка в машиностроении, приборостроении, 2023. – № 3. – С. 105-109.
5. Аверченков В.И. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей /В.И. Аверченков, А.С. Васильев, М.Л. Хейфец //Наукоемкие технологии в машиностроении, 2018. – № 10(88). – С. 27-32.
6. Дальский А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве /А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.; Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
7. Расторгуев Г. Технологическая наследственность и надежность в машиностроении. Теоретические и экспериментальные аспекты /Г. Расторгуев. – М.: Изд-во «Palmarium», 2014. – 180 с.
8. Грибков А.Н. Информационно-управляющие системы многомерными технологическими объектами: теория и практика: монография /А.Н. Грибков, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 164с.
9. Пьявченко Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы /Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007. – 271 с.
10. Colledani M. Dynamic implementation of function-oriented selective and adaptive assembly in small-lot production /M. Colledani, O.E. Demir //CIRP Annals, 2022. – Volume 71, Issue 1. – PP. 393-396. – DOI: 10.1016/j.cirp.2022.04.080.
11. Demir O.E. Function-based selective and adaptive cyber-physical assembly system for increased quality in optoelectronics industry / O.E. Demir, M. Colledani, R. Paoletti [etc.] //Computers in Industry, 2023. – Volume 148. – P. 103915. – DOI: 10.1016/j.compind.2023.103915.
12. Lanza G. Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching /G. Lanza, B. Haefner, A. Kraemer //CIRP Annals, 2015. – Volume 64, Issue 1. – PP. 399-402. – DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.123.
13. Lee J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems /J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao //Manuf. Lett., 2015. – 3(2015). – PP. 18-23. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
14. Monostori L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges /L. Monostori //Procedia CIRP, 2014. – 17(2014). – PP. 9-13.
15. Kumar S. An information model for process control on machine tools /S. Kumar, S.T. Newman, A. Nassehi [etc.] //Advances in Intelligent and Soft

- Compu-ting. Vol. 66 AISC. Springer, 2010. – PP. 1565-1582.
16. Сергеев А.С. Разработка информационно-управляющих систем для универсальных металлообрабатывающих станков [Электронный ресурс] /А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова, Д.Т. Арстангалиев [и др.] //NovaInfo.Ru: электрон. журнал, 2017. – № 66, т.1. – Режим доступа: <http://novainfo.ru/article/13176>.
17. Филипович О.В. Разработка структуры информационно-управляющей системы металлорежущего станка при наличии послеоперационного контроля /О.В. Филипович //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2017. №4-2(324). – С. 134-140.
18. Filipovich O. Recursive estimation of the parts production process quality indicator /O. Filipovich, V. Kopp, N. Voloshina, etc. //International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). - MATEC Web of Conferences, 2017. – 129. – P. 03026. – DOI: 10.1051/matecconf/201712903026.
19. Filipovich O. Model of information-control system used for one-parameter selective assembly of three elements /O. Filipovich, M. Maistrishin, V. Filipovich //Proceedings - 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2022), 2022. – PP. 876-880. – DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896338.
20. Филипович О.В. Имитационная модель селективной сборки трех элементов с сортировкой по оцениваемым значениям /О.В. Филипович //Сборка в машиностроении, приборостроении, 2022. – № 1. – С. 14-17.
21. Воскобойников Ю.Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем /Ю.Е. Воскобойников. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 136 с.

<sup>1</sup>*Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., доцент, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Filipovich Oleg Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Instrumentation and Transport, ophis1@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБМЕНОМ ДАННЫХ  
МЕЖДУ МОРСКИМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ  
ПО ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ**

Крамарь О.А.<sup>1</sup>, Димин М.Э.<sup>2</sup>, Тихонов Г.О.<sup>3</sup>

**USE OF ORTHOGONAL SEQUENCES TO ENSURE SECURE DATA  
TRANSMISSION OVER OPTICAL COMMUNICATION CHANNEL**

Kramar O.A.<sup>1</sup>, Dimin M.E.<sup>2</sup>, Tikhonov G.O.<sup>3</sup>

**Аннотация.** В настоящее время для исследования и освоения Мирового океана используют подводные робототехнические комплексы, например, обзорного класса оснащённые оптическими передатчиками и приёмниками для высокоскоростного обмена данными на небольшие расстояния. В ходе выполнения подводных операций в бортовой памяти подводного аппарата может быть скоплен большой объём полезной информации, которая может быть быстро передана беспроводным путём без непосредственного изъятия физического носителя данных, что повышает общую эффективность выполнения операции. Вместе с тем, данные в процессе передачи могут быть перехвачены сторонним устройством, не имеющим отношения к миссии. Для устранения подобных рисков, предлагается шифрование информации с помощью ортогональных последовательностей данных. Выполнено моделирование алгоритма шифрования цифрового пакета информации, передаваемой оптическим методом, а также исследованы характеристики качества передачи.

**Abstract.** Today, underwater robotic systems, such as inspection-class robotic systems equipped with optical transmitters and receivers for high-speed data exchange over short distances, are used to explore and develop the world's oceans. During underwater operations, a large amount of useful information can be accumulated in the onboard memory of the underwater vehicle. This information can be rapidly transferred wirelessly without directly removing the physical storage medium, thus increasing the overall efficiency of the operation. However, the data during transmission may be intercepted by a third-party device unrelated to the mission. To eliminate such risks, information encryption using orthogonal data sequences is proposed. In this paper, the algorithm for encrypting a digital packet of information transmitted by optical method is modelled and the characteristics of transmission quality are investigated.

**Ключевые слова.** Оптический канал связи, проектирование, ортогональные коды, информационная безопасность.

**Keywords.** Optical communication channel, design, orthogonal codes, information security.

## **Введение.**

Для проведения исследовательских, коммерческих или военных операций под водой всё чаще используются морские робототехнические комплексы, которые могут быть оснащены модулями беспроводной цифровой связи для возможности передать статусные или иные полезные данные о ходе проведения подводной операции. В качестве таковых модулей могут выступать как гидроакустические, так и оптические приёмо-излучатели, которые способны обмениваться информацией как по гидроакустическому, так и оптическому [1] каналам связи соответственно. Гидроакустический канал [2] связи является часто используемым надёжным способом передачи на расстояния от одного до десятков километров, но имеет ряд недостатков, связанных с высокой задержкой, низкой скоростью передачи и пропускной способностью [3]. Однако, в случае необходимости передачи больших объёмов данных вместо него может быть использован оптический способ передачи, обеспечивающий высокую скорость передачи с низкой задержкой, но на меньшие расстояния (до 5-10 метров) в виду возникновения интерференции и рассеивающих свойств воды.

В то же время, в процессе передачи может возникнуть необходимость защиты передаваемых данных, например, при вмешательстве стороннего устройства, так же оснащённого оптическим приёмником и излучателем, что может негативно сказаться на исходе подводной миссии.

Данная статья посвящена разработке алгоритма, повышающего помехоустойчивость оптического канала связи с помощью ортогональных последовательностей.

## **Описание алгоритмов шифровки и дешифровки данных.**

В работе предлагается использовать расширение длинны световой последовательности за счёт побитового шифрования входной последовательности данных ортогональными кодами. Таким образом даже в случае перехвата шифрованная последовательность не сможет быть декодирована без ключа шифрования. Кроме того, такой способ позволяет восстанавливать данные, даже если их часть утеряна или искажена в процессе передачи, так как один бит кодируется последовательностью конечной длинны.

Для декодирования последовательности используется вероятностный подход, в основе которого лежит алгоритм Хэмминга [4] для фиксации ошибок. Основная его идея заключается в том, что контрольные биты позволяют проверить правильность передачи данных на основе их расположения и значений. Расположение контрольных битов выбирается таким образом, чтобы каждый бит информации входил в несколько

контрольных проверок. При приёме данных происходит проверка соответствия контрольных битов исходным данным. Если обнаруживается ошибка, алгоритм Хэмминга позволяет исправить её в случае, если ошибка в одном бите, и указать на количество ошибок, если ошибки в нескольких битах.

Алгоритм шифрования имеет вид:

Шаг 1. Кодирование.

*Ввод. Бинарные данные (Bin\_data), ортогональная последовательность 0 (seq0), ортогональная последовательность 1 (seq1).*

*Для каждого элемента i в диапазоне от 1 до длины(data) выполнять:*

*если data(i) равно 1, то*

*добавить seq1 в конец encodedData*

*иначе*

*добавить seq0 в конец encodedData*

*Вывод. Зашифрованная последовательность (Encoded\_data).*

Шаг 2. Декодирование.

*Ввод. Зашифрованная последовательность, ортогональная последовательность 1, ортогональная последовательность 2.*

*Вычисление длин последовательностей данных и ортогональных последовательностей.*

*For (Длина зашифрованной последовательности)/(длина ортогонального кода)*

*P0 = вычисление сходства блока зашифрованных данных с последовательностью 1*

*P1 = вычисление сходства блока зашифрованных данных с последовательностью 2*

*Если (P0>P1) {*

*добавить 0 в конец последовательности*

*Если (P0<P1)*

*добавить 1 в конец последовательности*

*Иначе*

*Элемент последовательности = случайному значению (0 или 1)*

*end // конец условного оператора*

*end // конец оператора for*

*Вывод. Декодированная последовательность бинарных данных.*

### **Описание ортогональных кодов.**

Ортогональные коды представляют собой класс линейных кодов в теории кодирования, в которых каждые два различных кодовых слова имеют нулевое скалярное произведение, то есть они ортогональны друг другу.

В работе использовано два класса ортогональных кодов: Голда и Баркера, но для решения задачи могут быть задействованы и другие известные ортогональные коды, имеющие схожие свойства (например, коды Касами).

Ортогональные коды Голда (Gold sequences) [5] представляют собой наборы бинарных последовательностей длины

$$N = 2^n - 1,$$

которые обладают специальными свойствами ортогональности и автокорреляции.

Они получаются путем комбинирования двух коротких последовательностей ( $b_1$  и  $b_2$ ) с использованием операций сдвига и сложения по модулю 2:

$$Seq = b_1 \otimes b_2.$$

В данном случае  $n$  – порядок примитивных полиномов  $b_1$  и  $b_2$ , образующих последовательность Голда.

В рамках данной работы выбраны последовательности длины  $N = 31$ , порядок порождающих полиномов которых  $n = 5$  [6].

Кодом Баркера называется конечная последовательность из  $N$  значений  $+1$  и  $-1$ , со свойством идеальной автокорреляции, таким, что непиковые (нециклические) коэффициенты корреляции должны быть как можно меньше (Рис.1).

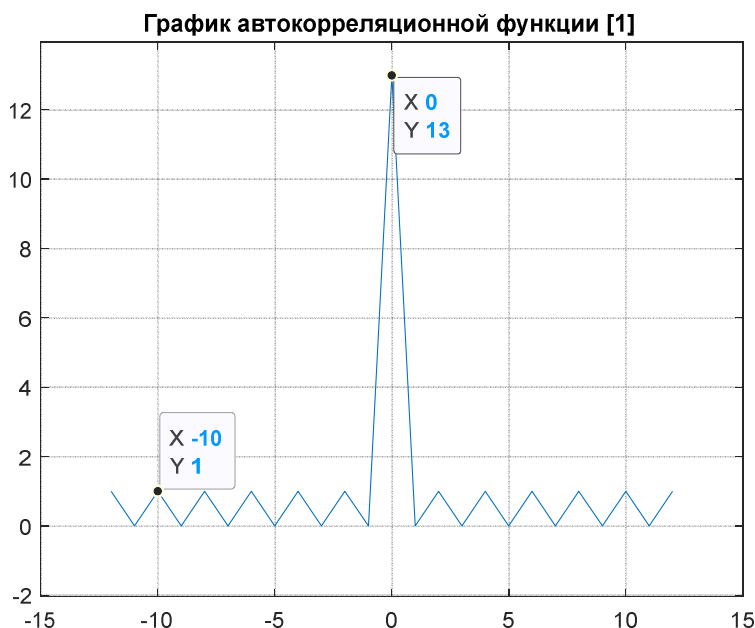
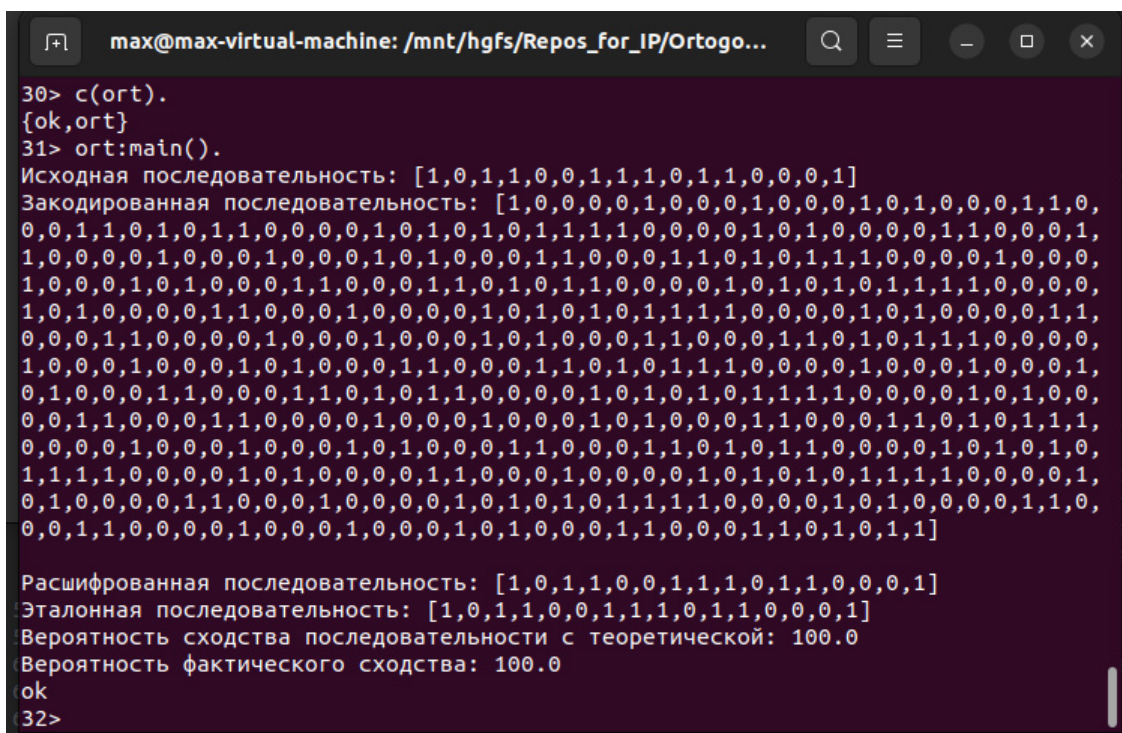


Рис.1 – График автокорреляционной функции для последовательности длиной  $N = 13$

В работе взяты последовательности длиной  $N = 13$ , которая является заранее известной. Последовательности считаются каноническими, а их длина не может быть больше  $N = 13$ .

### Описание результатов моделирования.

Описанный в п. 2 алгоритм реализован на функциональном языке Erlang (Рис.2), обладающим высокой отказоустойчивостью. Кроме этого, скомпилированный код под управлением BEAM на одной вычислительной платформе может затем исполняться на других вычислительных платформах, содержащих такую же виртуальную машину BEAM. Что избавляет программу от необходимости многократной переработки кода под другие вычислительные платформы.



```

30> c(ort).
{ok,ort}
31> ort:main().
Исходная последовательность: [1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1]
Закодированная последовательность: [1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,
0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,
1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,
1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,
1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,
0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,
1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,
0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,
0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,
0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,1,1,
0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,
1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,
0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,
0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1]
Расшифрованная последовательность: [1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1]
Эталонная последовательность: [1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1]
Вероятность сходства последовательности с теоретической: 100.0
Вероятность фактического сходства: 100.0
ok
32>

```

Рис.2 – Результат работы алгоритма на языке Erlang

Моделирование работы алгоритма было проведено в пакете прикладных программ MATLAB. Для моделирования взят и зашифрован набор тестовых данных

$$data = 1011001110110001.$$

После чего, производилось декодирование при различных видах повреждений:

- повреждение  $n$ -го количества бит в случайных местах последовательности (с учётом повторений) (Рис.3);
- повреждение каждого  $n$ -го количества бит в случайных местах последовательности (без учёта повторений) (Рис.4);

- повреждение каждого  $n$ -го числа бит с постоянной периодичностью (Рис.5);
- абсолютно случайная зашифрованная последовательность, созданная абстрагируясь от входных данных (Рис.6).



Рис.3 – График зависимости вероятности успешного декодирования от процента повреждённых данных (случайные повреждения с учётом повторов)

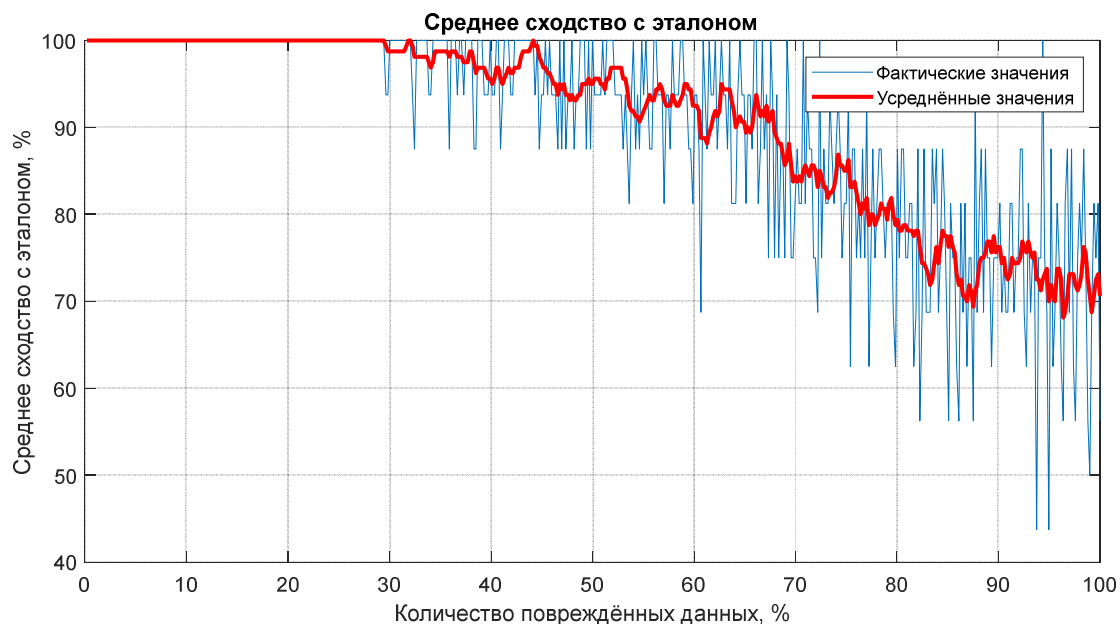


Рис.4 – График зависимости вероятности успешного декодирования от процента повреждённых данных (случайные повреждения без учёта повторов)



Рис.5 – График зависимости вероятности успешного декодирования от процента повреждённых данных (периодические повреждения)



Рис.6 – График зависимости вероятности успешного декодирования от процента повреждённых данных (произвольная последовательность)

В последствии по алгоритму Хэмминга вычислялось сходство расшифрованного набора данных с входным тестовым.

### **Заключение.**

Разработан алгоритм для обеспечения безопасной передачи данных по оптическому каналу связи путём расширения и декодирования

последовательности данных ортогональными кодами. Кроме того, исследованы свойства помехоустойчивости алгоритма при различных степенях повреждений зашифрованной последовательности. Как видно из представленных графиков, при повреждениях около 30-40% процентов произвольных сегментов данных, возможно передать данные без потерь. С повышением количества повреждений увеличивается количество неудачных случаев декодирования информации.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2024-0015.

### **Библиографический список**

1. Giuseppe Schirripa Spagnolo Underwater Optical Wiereless Communications: Overview / Giuseppe Schirripa Spagnolo, Lorenzo Cozzella, Fabio Leccese // Sensors 2020 №20, p. 2261.
2. Kazi Yasin Islam, Iftekhar Ahmad, Daryoush Habibi. Green Underwater Wireless Communications Using Hybrid Optical-Acoustic Technologies // IEEE Access 2021 vol. 9, pp. 85109 – 85123
3. Kebkal K.G. Experimental Estimation of Delivery Success of Navigation Data Packages transmitted via hydroacoustic Digital Hydroacoustic Communication Channel / K.G. Kebkal, V.K. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Petroccia // GYROSCOPY AND NAVIGATION. 2016, vol.7, no. 4, pp. 343-352.
4. Zhaoquan Zeng A Survey of Underwater Wireless Optical Communication / Zhaoquan Zeng, Huihui Zhang, Yuhan Dong, Julian Cheng. // IEEE Communications Surveys & Tutorials 2016, vol. 19 (1), pp. 204 – 238.
5. Зубарев В.Ю. Построение минимаксных ансамблей апериодических кодов Голда / В.Ю. Зубарев, Б.В. Пономаренко, Е.Г. Шанин, А.Г. Вострецов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 26–37. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-26-37
6. Maksymov V.V. Research of composite Barker codes / V.V. Maksymov, I.A. Khrapovitsky // The scientific heritage 2020, vol.48-1 (48), pp. 15-22.
7. Kebkal K. Practical steps towards establishing an underwater acoustic network in the context of the marine internet of things/ K. Kebkal// Applied Sciences (Switzerland) Том 14, 8, April 2024, 3527

<sup>1</sup>*Крамарь Олег Александрович, научный сотрудник, rolets@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Димин Максим Эдуардович, лаборант-исследователь, dimin.maksim@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>3</sup>Тихонов Георгий Олегович, лаборант-исследователь,  
ygorgik18@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»

*Kramar Oleg Alexandrovich, research officer, rolets@yandex.ru, Russia,  
Sevastopol, Sevastopol State University*

*Dimin Maksim Eduardovich, research laboratory technician,  
dimin.maksim@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Tikhonov Georgii Olegovich, research laboratory technician,  
ygorgik18@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ДИАГНОСТИКИ ИЗНОСА ПОДШИПНИКОВ

Мирзоян Н.Ю.<sup>1</sup>, Заморёнов М.В.<sup>2</sup>, Заморёнов И.М.<sup>3</sup>

## STOCHASTIC MODEL FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF AN ELECTRIC MOTOR, TAKING INTO ACCOUNT THE DIAGNOSIS OF BEARING WEAR

Mirzoyan N.Y.<sup>1</sup>, Zamoryonov M.V.<sup>2</sup>, Zamoryonov I.M.<sup>3</sup>

**Аннотация.** В статье строится аналитическая модель оценки надежности промышленного электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников. При построении модели используется аппарат полумарковских процессов и, разработанный авторами, метод траекторий. В качестве основного результата моделирования выбрано время безотказной работы системы. Для подтверждения правильности построения модели проводится сравнения математического ожидания времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний со средним стационарным временем пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний.

**Abstract.** The article builds an analytical model for assessing the reliability of an industrial electric motor, taking into account the diagnosis of bearing wear. When constructing the model, the apparatus of semi-Markov processes and the trajectory method developed by the authors are used. The system uptime is selected as the main result of the simulation. To confirm the correctness of the model construction, the mathematical expectation of the system's residence time in a subset of functional states is compared with the average stationary residence time of a semi-Markov process in a subset of states.

**Ключевые слова.** Полумарковская модель, электродвигатель, диагностика, безотказная работа, метод траекторий.

**Keywords.** Semi-Markov model, electric motor, diagnostics, trouble-free operation, trajectory method.

### Введение.

В настоящее время наблюдается серьезный рост промышленности в Российской Федерации, что неизбежно предъявляет большие требования к автоматизации производственных систем. Одним из основных элементов

автоматизированных систем являются электродвигатели, и от их надежности зависит надежность автоматизированных систем в целом [1-3].

В то же время надежность электродвигателя по большей части зависит от надежности движущихся элементов, которыми являются подшипники, обеспечивающие вращение ротора. В работе предлагается проанализировать систему с диагностикой износа подшипников, т.к. заменить износившийся подшипник проще и быстрее, чем отремонтировать электродвигатель после такой поломки [4]. Еще на надежность электродвигателей, конечно, значительно влияют условия их использования, однако в данной работе они не рассматриваются.

**Целью данной работы** является определение времени безотказной работы электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели будем использовать аппарат полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний [5-8].

Рассмотрим функционирование такой системы. Время её безотказной работы –  $\alpha_1$ , время восстановления –  $\beta_1$ . В случайный момент времени (через промежутки  $\alpha_2$  – время до диагностики подшипника) проводится диагностики, время проведения которой –  $\beta_2$ . Если диагностика выявила износ подшипника, то проводится его замена. Время износа подшипника –  $\alpha_3$ , время его замены –  $\beta_3$ .

Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния [9-12]:

$$E = \{S_{000}, S_{0x10y}, S_{0x00y}, S_{0w0z1}, S_{100}, S_{002}\}.$$

$S_{000}$  – система начала работу после восстановления;

$S_{0x10y}$  – начало диагностики, время до отказа системы –  $x$ , время до износа подшипника –  $y$ ;

$S_{0x00y}$  – система продолжила работу после диагностики, время до отказа системы –  $x$ , время до износа подшипника –  $y$ ;

$S_{100}$  – система отказала, идет восстановление;

$S_{0w0z1}$  – подшипник изнашивается, до время диагностики –  $w$ , время до отказа системы –  $z$ .

$S_{002}$  – диагностирован износ подшипника, идет его замена.

Граф состояний системы приведен на Рис.1.

Разделим все множество состояний системы на подмножества работоспособных  $E_+$  и неработоспособных  $E_-$  состояний:

$$E_+ = \{S_{000}, S_{0x10y}, S_{0x00y}, S_{0w0z1}\} \text{ и } E_- = \{S_{100}, S_{002}\}.$$

Причем

$$E = E_+ \cap E_-$$

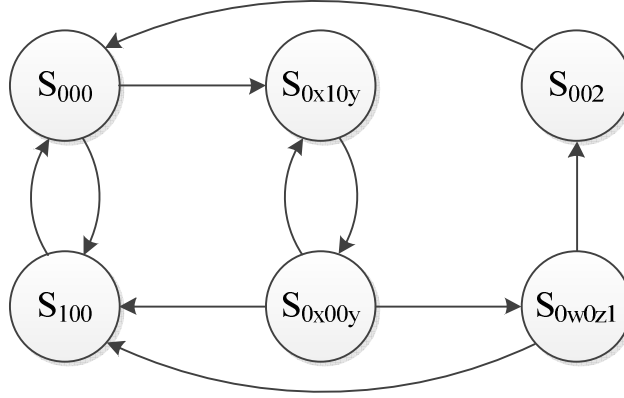


Рис.1 – Граф состояний системы

Необходимо определить функцию распределения времени пребывания системы в подмножестве  $E_+$ .

Найдем функции распределения времен пребывания в состояниях.

$$F_{000}(t) = 1 - \bar{F}_1(t)\bar{F}_2(t), \quad F_{0x10y}(t) = G_2(t),$$

$$F_{0x00y}(t) = 1 - \bar{F}_x(t)\bar{F}_y(t)\bar{F}_2(t),$$

$$F_{0w0z1}(t) = 1 - \bar{F}_w(t)\bar{F}_z(t),$$

$$F_{002}(t) = G_3(t), \quad F_{110}(t) = G_1(t).$$

Причем укрупненные функции распределений непрерывных компонент  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$ ,  $F_w(t)$  находим с использованием метода укрупнения регенерирующих систем [13]:

$$F_x(t) = \frac{\int_0^\infty [F_1(t+x) - F_1(x)]h_2(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_1(x)]h_2(t)dt}; \quad F_y(t) = \frac{\int_0^\infty [F_3(t+x) - F_3(x)]h_2(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_3(x)]h_2(t)dt};$$

$$F_w(t) = \frac{\int_0^\infty [F_x(t+x) - F_x(x)]f_y(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_x(x)]f_y(t)dt}; \quad F_z(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)]f_y(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)]f_y(t)dt};$$

где  $h_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_2^{(*)k}(t)$ , а \* – знак операции свертки.

Опишем вероятности переходов.

$$\begin{aligned} P_{100}^{000} &= P_{002}^{000} = P_{0x10y}^{0x00y} = 1; \\ P_{000}^{100} &= \int_0^{\infty} f_1(x) \bar{F}_2(t) dt; \quad P_{000}^{0x10y} = \int_0^{\infty} f_2(t) \bar{F}_1(x) dt; \\ P_{0x00y}^{100} &= \int_0^{\infty} f_x(t) \bar{F}_y(x) \bar{F}_2(x) dt; \quad P_{0x00y}^{0x10y} = \int_0^{\infty} f_2(t) \bar{F}_x(x) \bar{F}_y(x) dt; \\ P_{0x00y}^{0w0z1} &= \int_0^{\infty} f_y(t) \bar{F}_x(x) \bar{F}_2(x) dt; \\ P_{0w0z1}^{100} &= \int_0^{\infty} f_w(t) \bar{F}_z(x) dt; \quad P_{0w0z1}^{002} = \int_0^{\infty} f_z(t) \bar{F}_w(x) dt. \end{aligned}$$

Для получения искомых характеристик необходимо воспользоваться стационарным распределением вложенной цепи Маркова, для чего требуется составить и решить систему уравнений.

$$\begin{cases} \rho_{000} = \rho_{100} + \rho_{002} \\ \rho_{0x10y} = \rho_{000} P_{000}^{0x10y} + \rho_{0x00y} \\ \rho_{0x00y} = \rho_{0x10y} \\ \rho_{100} = \rho_{0x00y} P_{0x00y}^{100} + \rho_{0w0z1} P_{0w0z1}^{100} + \rho_{000} P_{000}^{100} \\ \rho_{0w0z1} = \rho_{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} \\ \rho_{002} = \rho_{0w0z1} P_{0w0z1}^{002} \end{cases}$$

Для корректного нахождения решения используется уравнение нормировки:

$$\rho_{000} + \rho_{0x10y} + \rho_{0x00y} + \rho_{100} + \rho_{0w0z1} + \rho_{002} = 1.$$

В ходе решения получаем:

$$\rho_{000} = \frac{1}{2 + \frac{P_{000}^{0x10y}}{1 - P_{0x00y}^{0x10y}} \cdot (2 + P_{0x00y}^{0w0z1})}.$$

Для нахождения искомой функции распределения воспользуемся методом траекторий [14,15].

Используя метод траекторий, определим все траектории перехода системы из подмножества  $E_+$  в подмножество  $E_-$ , их вероятности и времена пребывания системы на этих траекториях.

Траектории:

$$\begin{aligned} T_1 &: S_{000} S_{100}; \\ T_2 &: S_{000} S_{0x10y} S_{0x00y} S_{100}; \\ T_3 &: S_{000} S_{0x10y} S_{0x00y} S_{0w0z1} S_{002}. \end{aligned}$$

Вероятности траекторий:

$$\begin{aligned} P_T^1 &= \frac{P_{000}^{100}}{P_{000}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{0w0z1}}; \\ P_T^2 &= \frac{P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{100}}{P_{000}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{0w0z1}}; \\ P_T^3 &= \frac{P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{0w0z1}}{P_{000}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{100} + P_{000}^{0x10y} P_{0x00y}^{0w0z1}}. \end{aligned}$$

Определим времена пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, для чего сначала определим вероятности включения состояний в траектории:

$$\begin{aligned} P_S^{000} &= P_T^1 + P_T^2 + P_T^3; \\ P_S^{0x10y} &= P_T^2 + P_T^3; \\ P_S^{0x00y} &= P_T^2 + P_T^3; \\ P_S^{0w0z1} &= P_T^3. \end{aligned}$$

Далее, найдем коэффициенты увеличения времени пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий:

$$\begin{aligned} c_{000} &= \frac{\rho_{000}}{P_S^{000}(\rho_{100} + \rho_{100})}; \quad c_{0x10y} = \frac{\rho_{0x10y}}{P_S^{0x10y}(\rho_{100} + \rho_{100})}; \\ c_{0x00y} &= \frac{\rho_{0x00y}}{P_S^{0x00y}(\rho_{100} + \rho_{100})}; \quad c_{0w0z1} = \frac{\rho_{0w0z1}}{P_S^{0w0z1}(\rho_{100} + \rho_{100})}. \end{aligned}$$

Определим плотности распределения времен пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий. В области изображений по Лапласу эти плотности имеют вид:

$$\begin{aligned}\hat{f}_{000}^{\theta}(s) &= \frac{\hat{f}_{000}(s)}{c_{000} - (c_{000} - 1)\hat{f}_{000}(s)}; \\ \hat{f}_{0x10y}^{\theta}(s) &= \frac{\hat{f}_{0x10y}(s)}{c_{0x10y} - (c_{0x10y} - 1)\hat{f}_{0x10y}(s)}; \\ \hat{f}_{0x00y}^{\theta}(s) &= \frac{\hat{f}_{0x00y}(s)}{c_{0x00y} - (c_{0x00y} - 1)\hat{f}_{0x00y}(s)}; \\ \hat{f}_{0w0z1}^{\theta}(s) &= \frac{\hat{f}_{0w0z1}(s)}{c_{0w0z1} - (c_{0w0z1} - 1)\hat{f}_{0w0z1}(s)},\end{aligned}$$

где  $\hat{f}_n(s)$  – изображение плотности распределения  $f_n(t)$  времени пребывания системы в состоянии  $n$ .

Плотности распределения времен пребывания системы на траекториях:

$$\begin{aligned}f_T^1(t) &= f_{000}^{\theta}(t); \\ f_T^2(t) &= f_{000}^{\theta}(t) * f_{0x10y}^{\theta}(t) * f_{0x00y}^{\theta}(t); \\ f_T^3(t) &= f_{00}^{\theta}(t) * f_{0x10y}^{\theta}(t) * f_{0x00y}^{\theta}(t) * f_{0w0z1}^{\theta}(t),\end{aligned}$$

где  $*$  – знак операции свертки.

Плотность распределения времени пребывания системы в подмножестве  $E_+$  [15] определяется как взвешенная сумма плотностей распределения времен пребывания системы в траекториях, причем коэффициентами взвеси служат вероятности реализации этих путей:

$$f_+(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P_T^i \cdot f_T^i(t).$$

Рассмотрим пример моделирования такой системы с известными параметрами распределения случайных величин.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$ ,  $F_3(t)$ ,  $G_1(t)$ ,  $G_2(t)$  и  $G_3(t)$  которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами  $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \eta_1, \eta_2, \omega_1, \omega_2$  соответственно с учетом зависимостей:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1}, \quad f_3(t) = \frac{\eta_1 \eta_2 (e^{-\eta_1 t} - e^{-\eta_2 t})}{\eta_2 - \eta_1},$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \quad g_2(t) = \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1}, \quad g_3(t) = \frac{\omega_1 \omega_2 (e^{-\omega_1 t} - e^{-\omega_2 t})}{\omega_2 - \omega_1},$$

где  $\lambda_1 = 0,0133 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2 = 0,04 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\mu_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\mu_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\eta_1 = 0,00667 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\eta_2 = 0,02 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\nu_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\gamma_1 = 1,33 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 4,0 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\omega_1 = 0,667 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 2,0 \text{ ч}^{-1}$ .

На Рис.2 приведены искомые  $F_+(t)$  функция и  $f_+(t)$  плотность распределения, полученные в данной работе.

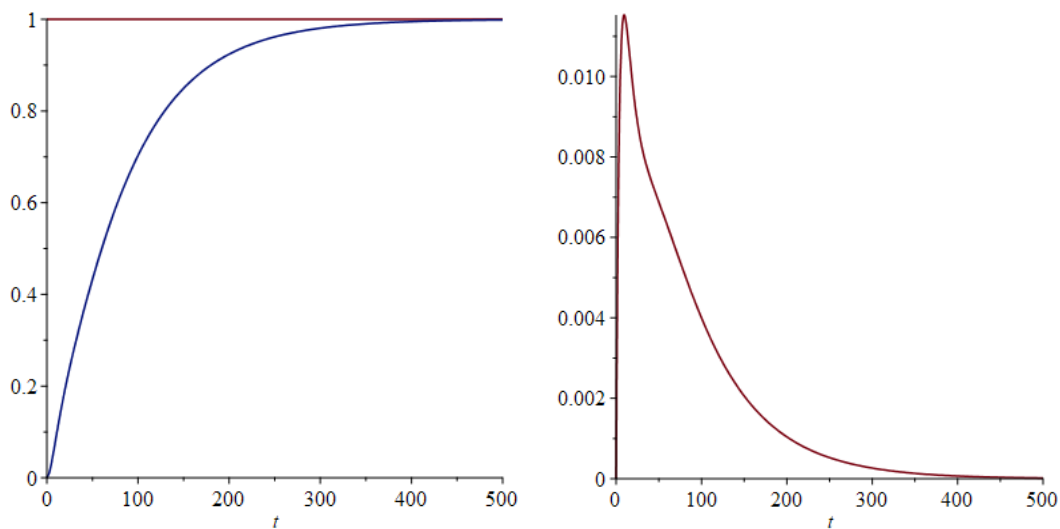


Рис.2 – Вид функции и плотности распределения времени пребывания системы в подмножестве  $E_+$

Сравним значения математического ожидания полученной функции и математического ожидания, определяемого на основании теоремы о среднем стационарном времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in E_+} m_i \rho_i}{\sum_{k \in K \subset E_+} \sum_{j \in E_-} P_{kj} \rho_i}. \quad (1)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет 81,3883159 ч, тогда как, определяемое с помощью выражения (1) – 81,3883159 ч.

Можно утверждать, что математические ожидания совпадают.

### **Выводы.**

Проведенное сравнение математических ожиданий времен пребывания в подмножестве работоспособных состояний состояний, полученных на основании найденной в работе функции распределения и на основании теоремы о среднем стационарном времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний, показало правильность построения модели и полученных результатов.

В дальнейших исследованиях планируется построение более сложных моделей анализа надежности электродвигателей, а также имитационных моделей анализируемых систем.

### **Библиографический список**

1. Клитанев, В.А., Теория надежность сложных систем / В.А. Клитанев, А.И. Медведев. – М.: Физматлит, 2010 – 16 с.
2. Поляков, А.Е. Электрические машины, электропривод и системы / А.Е. Поляков, А.В. Чесноков, Е.М. Филимонова. – М.: Форум, 2016 – 240 с.
3. Архипцев, Ю.Ф. Асинхронные электродвигатели / Ю.Ф. Архипцев. – М.: Книга по требованию, 2013 – 108 с.
4. Мандарыкин, С.А. Ремонт асинхронных электродвигателей / С.А. Мандарыкин. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 85 с.
5. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. Монография /В.Я.Копп – Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700с.
6. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я.Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 240с.
7. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.
8. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
9. Королюк В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф. Турбин – Киев: Наукова думка, 1989 – 208 с.
10. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
11. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королюк. // Кибернетика. 1981. №4. С. 121 – 124.
12. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.

13. Заморёнов М.В. Метод моделирования регенерирующих систем. / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова // Математическое моделирование. Т. 30. № 6. 2018. – С. 134-144.
14. Копп В.Я. Использование метода траекторий для построения полумарковской модели структуры "Технологическая ячейка – Накопитель" / В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Ю.Е. Обжерин, М.Ю. Ларин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 3 (247). 2016. – С. 23-34.
15. Заморёнов М.В. Моделирование процесса функционирования облачной системы хранения данных методом траекторий / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова, Е.С. Владимирова // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. № 1 (9) – 2020. – С. 28-39.

<sup>1</sup>*Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nataly2997@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>3</sup>*Заморёнов Илья Михайлович, ассистент, imzamoryonov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Mirzoyan Natalia Yurievna, assistant, nataly2997@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical sciences, associate professor, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Zamoryonov Ilya Mikhailovich, assistant, imzamoryonov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Моисеев Д.В.<sup>1</sup>, Севрюков И.Т.<sup>2</sup>, Ильин В.В.<sup>3</sup>, Козлов В.В.<sup>4</sup>

## LARGE-SCALE EFFECTS IN MODELING NONEQUILIBRIUM PROCESSES

Moiseev D.V.<sup>1</sup>, Sevryukov I.T.<sup>2</sup>, Ilyin V.V.<sup>3</sup>, Kozlov V.V.<sup>4</sup>

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема моделирования сложных процессов, развивающихся в твердых телах при ударном нагружении, процессов деформации и разрушения цилиндрических объектов, проблема имеет фундаментальное значение, так как пространственные масштабы многих явлений и процессов, представляющих интерес, несопоставимы с масштабами технически возможных лабораторных исследований. Анализируются критерии подобия и особенности кинетики масштабных фазовых переходов.

**Annotation.** The article considers the problem of modeling complex processes developing in solids under shock loading, deformation and destruction of cylindrical objects, which is of fundamental importance, since the spatial scales of many phenomena and processes of interest are incomparable with the scales of technically possible laboratory studies. Similarity criteria and features of the kinetics of large-scale phase transitions are analyzed.

**Ключевые слова.** Фазовые переходы, детонация, взрывное разрушение, критерии подобия, диссипативная структура.

**Keywords.** Phase transitions, detonation, explosive destruction, similarity criteria, dissipative structure.

### Введение.

Одним из наиболее эффективных подходов к анализу процессов функционирования сложных систем является имитационное моделирование. Часто в процессе комплексного анализа сложных систем возникают задачи исследования отдельных видов оборудования и аппаратуры, входящих в их инфраструктуру, а также технологических процессов эксплуатации этих устройств. В этом случае применение имитационного моделирования позволяет качественно решить эти задачи. Создание и исследование имитационных моделей сложных систем требует

значительных усилий высококвалифицированных специалистов, а их выполнение – ресурсоемких вычислений [1]. Проблема адекватного моделирования процессов, развивающихся в твердых телах при ударном нагружении, имеет фундаментальное значение, так как пространственные масштабы многих явлений и процессов, представляющих интерес, несопоставимы с масштабами технически возможных лабораторных исследований.

Вопрос о масштабных эффектах (МЭ) при разрушении твердых тел неоднократно поднимался в научных публикациях. Несмотря на то, что преобладающей сегодня является точка зрения, утверждающая принципиальную возможность корректного учета масштабных факторов, при переносе результатов лабораторного моделирования на натурные конструкции неуклонно растет число экспериментальных и теоретических исследований, указывающих на принципиальную сложность адекватного прямого моделирования процессов деформации и разрушения крупногабаритных объектов. Наиболее радикальной является точка зрения о существовании кинетических фазовых переходов (КФП) и масштабных фазовых переходов (МФП).

#### **Исследование кинетических фазовых переходов и масштабных фазовых переходов.**

Несмотря на существование альтернативных точек зрения как на природу масштабных эффектов, так и на методы его учета, обсуждалось лишь монотонное уменьшение прочности с увеличением характерных размеров образцов. Что касается процессов в химически активных телах, например детонации цилиндрических зарядов взрывчатых веществ, то принято считать, что если диаметр заряда  $d_{\text{вв}}$  больше  $d_{\text{пр}}$ , то его чувствительность к удару и кинетика процесса (скорость детонации  $D$ , полнота превращения  $\varphi$ ) практически не зависят от  $d_{\text{вв}}$  (Рис.1).

В то же время известно, что в открытой системе, выведенной из состояния равновесия, каковой, очевидно, является и нагружаемое ударом тело, возможны кинетические фазовые переходы, сопровождающиеся процессами внутренней самоорганизации, связанной с формированием диссипативных структур (ДС) и КФП между состояниями. Изменение вида диссипативных структур может быть вызвано либо развитием флуктуации при критических значениях параметров системы, либо изменением внешних параметров, приводящих к исчезновению исходного устойчивого состояния и динамической перестройке ДС.

По-видимому, все КФП могут быть представлены схемой, связывающей формирование ДС с когерентным перераспределением «квазичастиц» (элементов ДС предыдущего уровня), сопровождающимся испусканием «возбуждений» (флуктуаций), обеспечивающих производство

энтропии. Следствием этого является существенное влияние размерности, размеров, геометрической формы и граничных условий на характер КФП и вид формируемых ДС. Это, естественно, не исключает возможности существования областей (в пространстве управляющих параметров), в которых параметры ДС не зависят явно от геометрии и размеров системы и граничных условий.

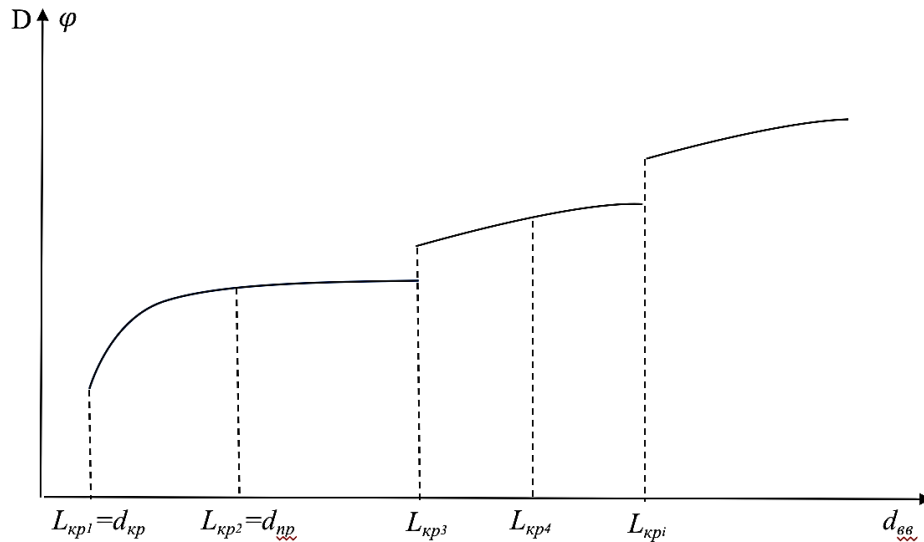


Рис.1 – Зависимость скорости детонации и полноты превращения от диаметра заряда

В то же время можно утверждать, что фундаментальным свойством всех систем конечных размеров, испытывающих КФП, является существование некоторой последовательности масштабных фазовых переходов — скачкообразных изменений вида формируемых диссипативных структур при переходах через критические значения пространственных размеров  $L_{кр}$  (число МФП ограничено физическими пределами масштабов конкретной системы) и сохранении геометрического подобия. Классическими примерами масштабных фазовых переходов могут служить переходы между различными структурами ячеек Бенара при изменении высоты сосуда и переходы между турбулентными структурами в жидкости (включая переход от ламинарного к турбулентному режиму) при увеличении диаметра трубы или обтекаемого тела ( $V = \text{const}$ ). Если в области параметров, где определяющим является один критерий подобия (МФП подобны КФП), то добиться удовлетворения даже двух критериев подобия при значительном различии  $L$  модели и натуры невозможно. Поэтому характер КФП и МФП и вид формируемых ДС могут существенно различаться. Это необходимо учитывать при моделировании сильно неравновесных процессов [2, 3].

Явление взрывного разрушения объектов тесно связано с масштабными эффектами различной природы. Однако, если даже исключить масштабные эффекты, обусловленные режимами изготовления элементов различного размера, и эффекты, связанные с этим (покрытие, сварка, влияние внешней среды), а влияние изменения температуры, скорости деформации элемента (при изменении размеров объекта) отражать через уравнения состояния материалов, то отличие в поведении подобных объектов будет определяться геометрическим масштабным эффектом. Так, при геометрическом подобии объектов и одинаковом характере нагружения запасы упругой энергии будут пропорциональны  $L^3$ .

Для тонких цилиндрических оболочек величина удельной упругой энергии будет равна [6]:

$$q = \frac{\sigma^2}{E},$$

а полный запас упругой энергии определяется выражением:

$$Q_y = \frac{LR^2\sigma^2}{E},$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $E$  – модуль Юнга.

Для сложных геометрических объектов величина  $\sigma$  будет некоторой характерной величиной неоднородного напряженного состояния. Очевидно, что при взрывном разрушении объекта формирование трещин происходит за счет иных видов энергии; необходимым условием разрушения является:

$$Q_y = A_{rz},$$

или

$$\frac{L^3\sigma_p^2}{E} = L^2\lambda.$$

где  $\lambda$  – удельная работа, затрачиваемая на распространение трещин.

При  $\lambda = const$  и  $E = const$  имеем [1,3]:

$$\frac{\sigma_{\rho_1}}{\sigma_{\rho_2}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1/6},$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объемы натуре и модели соответственно;  $\sigma_{\rho_1}$  и  $\sigma_{\rho_2}$  – напряжения разрушения объекта и модели.

Очевидно, что любая общая теория разрушения объектов должна учитывать существование геометрических масштабных эффектов. Поэтому теории, основанные на локальных критериях разрушения, вряд ли могут быть эффективны при прогнозировании поведения крупномасштабных объектов.

Нагружаемый ударом объект с термодинамической точки зрения является открытой системой, находящейся в состоянии, далеком от равновесия, в котором возможно развитие целого ряда необратимых процессов: деформация, разрушение, детонация, горение.

Особенности кинетики МФП рассмотрим на примерах ударного нагружения твердых тел. КФП, инициируемые ударом, могут быть описаны системой обобщенных нестационарных уравнений Гинзбурга–Ландау [6]:

$$\left( \frac{d}{dt} - a_{\eta i} (\nabla + iq)^2 \right) n_{ij} = V_{ij} (\nabla, \eta_{kl}, q, x, T_i), \quad (1)$$

дополненных и определяемых геометрией тела и свойствами окружающей среды. При этом:  $T_i$  – управляющие параметры,  $V_{ij}$  – синергетический потенциал. Анализ задачи в общем виде позволяет выделить три принципиально различных механизма МФП, в основе которых лежат:

– зависимость условий устойчивости ДС от размеров тела  $L$ , его геометрии и граничных условий;

– зависимость характерных масштабов ДС ( $L_{DC}^i$ ) от  $L$ , обуславливающая достижение условий самоорганизации внутри элементов ДС при  $L_{DC}^i(L) > L_{DC}^i(L_{kpi})$ ;

– условия, когда  $L_{DC}^i$  не зависят или слабо зависят от  $L$  при  $L > L_{kpi}$ , т.е. достигаются условия самоорганизации ансамбля элементов ДС, приводящей к формированию ДС большего масштаба.

Для всех МФП при увеличении  $L$  характерно понижение внутренней симметрии вследствие появления нового внутреннего масштаба длины  $L_{DC}^i$ . Отсюда непосредственно следует  $S$ -теорема для МФП, доказанная в [5,6] для КФП. Причем если

$$\frac{L_{DC}^{i-1}}{L_{DC}^i} = \frac{L_{DC}^i}{L_{DC}^{i+1}}, \quad (2)$$

то энтропия  $S$  при МФП не изменяется, а производство энтропии  $S_j$  уменьшается. Если условие (2) не выполняется, то МФП сопровождается скачками  $S$  и  $S_j$ , обуславливающими скачкообразное уменьшение прочности, увеличение  $\varphi$  и  $D$ , изменение чувствительности и т.д. Математически ситуация здесь аналогична исследованной в [4] при изучении структурных фазовых переходов в соразмерные и несоразмерные фазы. Несоразмерные ДС формируются при масштабных фазовых переходах, если  $V_{ij}$  содержит новые составляющие [6].

Появление новых независимых  $L_{DC}^i$  при МФП в соответствии с  $\pi$ -теоремой приводит к увеличению числа безразмерных критериев подобия, т.е. при МФП первого рода увеличивается число убавляющих параметров КФП, явно зависящих от размеров тела. Таким образом, существование масштабных фазовых переходов между различными режимами разрушения конструкционных материалов и различными режимами детонации твердых топлив обусловлено наличием большого числа определяющих критериев подобия процессов разрушения и детонации, имеющих различные зависимости от геометрических размеров. Приведем ряд критериев подобия, определяющих кинетику МФП между различными стационарными режимами разрушения [1]:

$$z_1 = \frac{\hat{\sigma}L}{E_{ij}}, \quad z_2 = \frac{L\gamma}{\hat{\sigma}}, \quad z_3 = \frac{LV_0 H_{isp} \alpha \rho}{\chi}, \quad B_i = \frac{L\xi}{\chi}.$$

Рассмотренные критерии подобия для проникания индентора в полубесконечную среду следует дополнить следующими параметрами [3]:

$$R_e = \frac{uL}{v}, \quad B_k = \frac{\dot{\epsilon}L_{CD}}{c_k}, \quad B_T = \frac{\dot{\epsilon}L_{CD}}{c_T}, \quad B_l = \frac{\dot{\epsilon}L_{CD}}{c_l}, \quad B_R = \frac{\dot{\epsilon}L_{CD}}{c_R}, \quad M_k = \frac{u}{c_k},$$

$$M_T = \frac{u}{c_T}, \quad M_l = \frac{u}{c_l}, \quad M_R = \frac{u}{c_R},$$

где  $E_{ij}$  – модуль упругости;  $u$  – скорость проникания;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $c_l$  – скорость звука;  $c_R$  – минимальная скорость вещества во фронте ударной волны, обеспечивающей режим взрывного испарения;  $c_k$  и  $c_T$  – местная и предельная скорости роста трещин, связанные соотношением  $c_T = \sqrt{c_l c_k}$ ;  $\hat{\sigma}$  – тензор напряжений,  $\alpha$ ,  $\chi$ ,  $\xi$  и  $v$  – коэффициенты теплового расширения, теплопроводности, теплоотдачи и вязкости соответственно.

Критерии подобия, явно зависящие от  $d_{вв}$  для процесса стационарной детонации, имеют вид [1]:

$$\delta_1 = \frac{d_{кр}}{d_{вв}}, \quad \delta_2 = \frac{d_{np}}{d_{вв}}, \quad \delta = \frac{QE_0 D d_{вв}}{\chi}, \quad z_4 = \frac{\alpha \rho Q D d_{вв}}{\chi}, \quad B_i = \frac{\xi d_{вв}}{\chi},$$

где  $\rho$  – плотность;  $T_0$  – начальная температура;  $Q$  и  $E_0$  – удельные энергии химической реакции и активации взрывного процесса.

Результаты рассмотрения МФП между различными режимами детонации приведены на Рис.2. Заметим, что еще большие скачки при  $L_{кр}$  испытывает чувствительность ВВ к удару, определяемая по уровню нагружения, обеспечивающего выход процесса на стационарный режим.

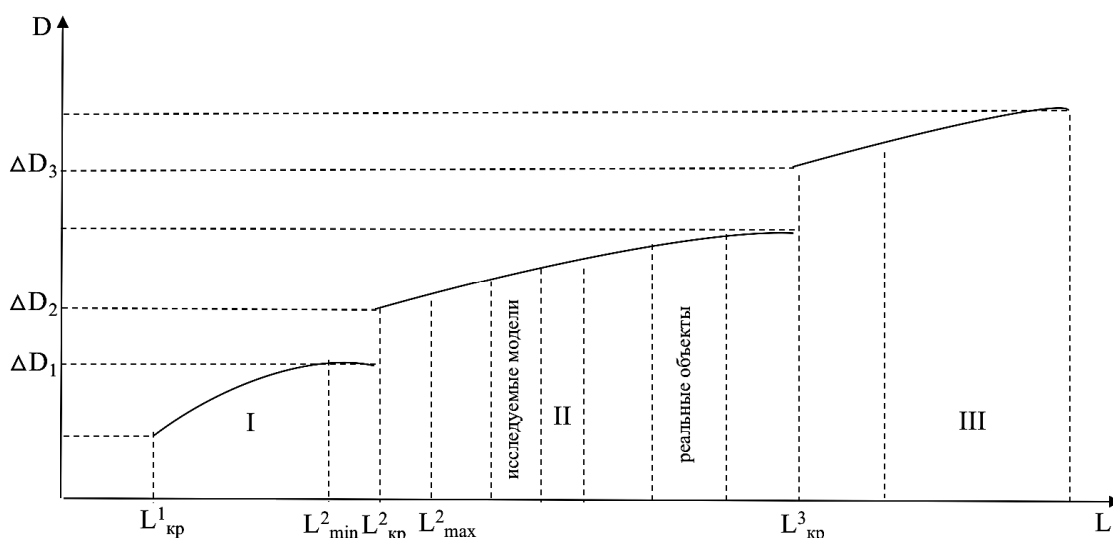


Рис.2 – Зависимость скорости детонации цилиндрического заряда ВВ от размеров металлической оболочки: I-область лабораторного моделирования; II- область полигонных испытаний (крупногабаритные модели, малые натурные заряды; III- область крупномасштабных полигонных испытаний

Здесь ситуация усложняется конкуренцией процессов деформации, разрушения и инициируемых ударом химических процессов, имеющих различные зависимости характерных времен от  $d_{ВВ}$ .

Таким образом, возникает потребность в высокоуровневых инструментальных средствах автоматизации адекватного моделирования процессов, развивающихся в твердых телах при ударном нагружении, которые позволят максимально использовать потенциал высокопроизводительной вычислительной техники и обеспечат построение сложной технологической цепочки: от специалиста-предметника, формулирующего задачу, к математику, создающему модель, затем к программисту и только потом – к тем, кто занимается непосредственно вычислениями [7-10].

### Выводы.

В заключение отметим, что уравнение вида (1) в осесимметричном случае с жесткими граничными условиями допускает возникновение спиральной волны при  $d$ , превышающем  $L_s$  и равном полупериоду спирали. Таким образом, в твердом ВВ, помещенном в цилиндрическую оболочку с внутренним диаметром  $d > L_s$ , изготовленную из материала с большей, чем у ВВ, возможно распространение спиновой детонационной волны, подобной спиновой детонационной волне в газообразном ВВ. В цилиндре из хрупкого материала, заключенного в прочную оболочку с большей акустической жесткостью, при  $d > L_s$  хорошо известная плоская волна разрушения должна смениться на спиновую волну разрушения.

## Библиографический список

1. Феоктистов, А. Г. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем в распределенной вычислительной среде / А.Г. Феоктистов, О.Ю. Башарина // Программные продукты и системы. – 2015. – № 3. – С. 75-79.
2. Баланкин А.С. Масштабные эффекты в кинетике ударного разрушения и взрыва твердых тел и проблема моделирования неравновесных процессов/А.С. Баланкин, А.А. Любомудров, И.Т. Севрюков// ЖТФ. – 1989. –Т.59. –С.102–105.
3. Андреевских Л.А. Практический способ контроля детонационного сечения повышенной точности / Л.А. Андреевских, Л.В. Фомичева, И.П. Хабаров // Химическая физика процессов горения и взрыва: Материалы XII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 2000. Часть II. С.115–117.
4. Балинец Ю.Н. О начальной фазе инициирования в прессованном тротиле / Ю.Н. Балинец, И.А. Карпухин // Физика горения и взрыва. 1981. Т.17, № 1. С.103–109
5. Баум Ф.А. Физика взрыва /Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. М.: Физматлит. – 1959. – 530с.
6. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968. – 255 с.
7. Moiseev, D. Method for detecting vulnerabilities of unmanned vehicle interfaces based on continuous values discretization / D. Moiseev, A. Bryukhovetskiy // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47.
8. Севрюков И.Т., Степичев М.М. Методология исследования взрывобезопасности военно-технических систем в концепции обеспечения национальной безопасности / И.Т. Севрюков, М.М. Степичев // Вооружение. Политика. Конверсия. 2007. № 4.
9. Кузнецов В.И. Диалектика развития химии / В.И. Кузнецов М.: Наука. – 1973. – 328 с.
10. Skatkov, A. Effectiveness analysis of the kulback's information measure in the technological objects monitoring / A. Skatkov, A. Brjuhoveckij, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, 11–15 сентября 2017 года. Vol. 129. – Sevastopol: EDP Sciences, 2017. – P. 03025. – DOI 10.1051/matecconf/201712903025.

<sup>1</sup>Моисеев Дмитрий Владимирович, д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой, [dvmoiseev@mail.sevsu.ru](mailto:dvmoiseev@mail.sevsu.ru), Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

<sup>2</sup>Себряков Игорь Тихонович, д-р. техн. наук, проф., старший научный сотрудник, [agshokin@mail.sevsu.ru](mailto:agshokin@mail.sevsu.ru), Россия, Балашиха, ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого»

<sup>3</sup>Ильин Вадим Владимирович, д-р. техн. наук, профессор, Россия, Пермь, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

<sup>4</sup>Козлов Вячеслав Владимирович, д-р. техн. наук, проф., профессор, [vvkozlov@mail.ru](mailto:vvkozlov@mail.ru), Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова

*Moiseev Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, [dvmoiseev@mail.sevsu.ru](mailto:dvmoiseev@mail.sevsu.ru), Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Sevryukov Igor Tikhonovich, doctor of technical sciences, professor, senior researcher, [agshokin@mail.sevsu.ru](mailto:agshokin@mail.sevsu.ru), Russia, Balashikha, The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great*

*Ilyin Vadim Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Perm, Perm State University*

*Kozlov Vyacheslav Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, professor, [vvkozlov@mail.ru](mailto:vvkozlov@mail.ru), Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov*

## ЗАМЕНА КОСОСИММЕТРИЧНОЙ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ

Бохонский А.И.<sup>1</sup>, Варминская Н.И.<sup>2</sup>, Майстришин М.М.<sup>3</sup>

## REPLACING THE OBLIQUE-SYMMETRICAL CONTROL FUNCTION WITH AN EQUIVALENT ANALYTICAL

Bokhonsky A.I.<sup>1</sup>, Varminskaya N.I.<sup>2</sup>, Maystrishin M.M.<sup>3</sup>

**Аннотация.** С целью упрощения практической реализации реверсионно конструируемого оптимального управления (переносного ускорения) предложена эквивалентная по энергоемкости замена другой аналитической функцией. Используются наиболее простые условия: равенство скоростей в середине интервала движения объекта и равенство перемещения к концу оптимального движения. Такая замена одного типа управления другими обеспечит достижение цели движения с сохранением прежней энергоемкости.

**Annotation.** In order to simplify the practical implementation of the reversible design of optimal control (transferable acceleration), an energy-intensive replacement with another analytical function is proposed. Using the simplest conditions: equality of speeds in the middle of the interval of movement of the object and equality of movement towards the end of the optimal movement. This replacement of one type of control with others provides the goals of movement.

**Ключевые слова.** Кососимметричное управление (ускорение), энергоемкость управления, эквивалентная замена управления, достижение цели движения, тенденция снижения энергоемкости.

**Keywords.** Skew-symmetric control (acceleration), energy intensity of control, equivalent replacement of control, achieving the goal of movement, tendency to reduce energy intensity.

### Введение.

Теории оптимального управления посвящены классические труды [1–5] и другие. Непосредственно методам оптимального управления колебаниями упругих систем посвящена, например, работа [6].

С развитием сложных робототехнических и автоматизированных систем возникла необходимость подавлять колебания, порождаемые оптимальным переносным движением систем с элементами конечной жесткости.

Поиску оптимальных управлений переносным поступательным и вращательным движениями объектов конечной жесткости с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления посвящены работы [7-12]. Экспериментальные исследования по проверке полученных теоретических результатов отражены в работах [13-14].

Экспериментальная проверка тенденции снижения энергоемкости при росте степени полинома конструируемого управления и до настоящего времени не проводилась.

**Цель исследований** – использование аналитической функции ускорения для эквивалентной замены реверсионно конструируемого оптимального управления переносным поступательным движением объекта.

#### **Основная часть.**

В результате обобщения исследований выявлены универсальные аналитические зависимости: для переносного ускорения (управления), скорости и перемещения объекта при движении из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя (заданы – время движения и величины линейного либо углового перемещения). Для произвольной нечетной степени полинома такие зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{L}{T^2} (2n+4) \left( \frac{T-2t}{T} \right)^n, \\ V(t) &= \frac{L}{T} \frac{n+2}{n+1} \left( 1 - \left( \frac{T-2t}{T} \right)^{n+1} \right), \\ S(t) &= \frac{L}{2T(n+1)} \left( \left( \frac{T-2t}{T} \right)^{n+2} + 2nt + 4t - T \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $L$  – перемещение;  $T$  – общее время движения;  $n$  – нечетная степень полинома.

Из (1) при  $n=1$  следует известное классическое управление (задача Лагранжа), полученное вариационным методом теории оптимального управления при использовании критерия оптимальности  $\int_0^T U^2 dt$ .

При использовании аналитических зависимостей (1) выявлена тенденция снижения энергии для достижения цели движения с ростом степени полинома. Дальше вычисляются универсальные характеристики движения для степеней полинома  $n=1$  и  $n=5$ .

Для степени  $n=1$  (классического управления, при  $T = \pi$  с,  $L=1$  м) графики  $U(t)$ ,  $V(t)$ ,  $S(t)$  изображены на Рис.1.

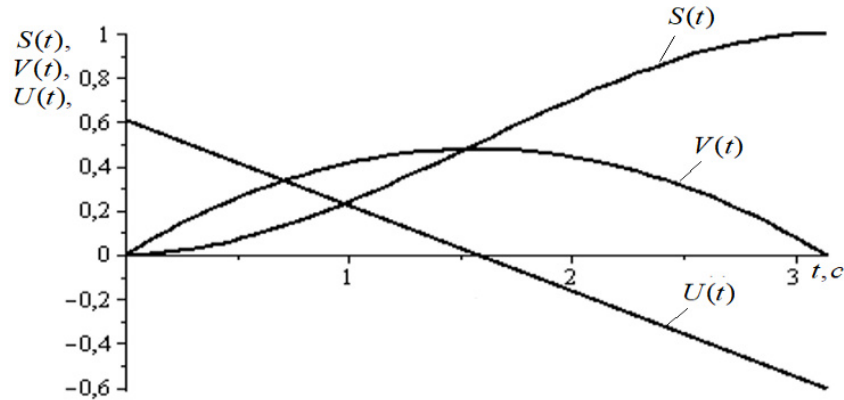


Рис.1 – Графики перемещения  $S(t)$ , скорости  $V(t)$ , ускорения  $U(t)$   
( $n = 1$ ,  $T = \pi$  с,  $L = 1$  м)

В этом случае ( $m = 1$  кг) затрачиваемая на реализацию движения энергия равна

$$A = 2 \int_0^{T/2} UV dt = 0,2279 \text{ Дж},$$

действие по Лагранжу  $J = \int_0^T V^2 dt = 0,3819 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}},$

норма мощности (классический критерий)  $J_1 = \int_0^T U^2 dt = 0,38 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$

Для  $n = 3$ ,  $T = \pi$  с,  $L = 1$  м эти показатели следующие:  $A = 0,1379$  Дж,  
 $J = 0,3427 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}, J_1 = 0,5746 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$

Если, например,  $n = 5$ ,  $T = \pi$  с,  $L = 1$  м, то  $A = 0,0569$  Дж,  
 $J = 0,1909 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}, J_1 = 0,048 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$

Очевидно, что с увеличением времени движения затрачиваемая на реализацию движения энергия уменьшается.

Для  $n = 5$ ,  $T = 2\pi$  с,  $L = 1$  м, то  $A = 0,03447$  Дж,  $J = 0,1719 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}},$   
 $J_1 = 0,0718 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}.$

Графики  $S(t)$ , скорости  $V(t)$ , ускорения  $U(t)$  для этого случая изображены на Рис.2; затрачиваемая на движение энергия уменьшается, например, по сравнению с классическим случаем ( $n = 1$ ) при  $T = 2\pi$  с.

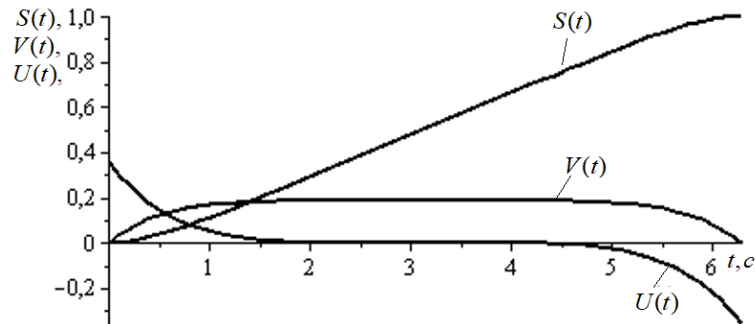


Рис.2 – Графики перемещения  $S(t)$ , скорости  $V(t)$ , ускорения  $U(t)$   
( $n = 5$ ,  $T = 2\pi$  с,  $L = 1$  м)

Примеры вычисленных универсальных характеристик движения сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристики управляемого движения

| Конструируемые управления |        |                                |                                               |                                                   |                                          |
|---------------------------|--------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $n$                       | $T, c$ | $A = 2 \int_0^{T/2} UV dt, Дж$ | $J = \int_0^T V^2 dt, \frac{кг \cdot м^2}{с}$ | $J_1 = \int_0^T U^2 dt, \frac{кг \cdot м^2}{с^3}$ | $V\left(\frac{T}{2}\right), \frac{м}{с}$ |
| $n = 1$                   | $\pi$  | 0,22792                        | 0,3819                                        | 0,3870                                            | 0,4775                                   |
|                           | $2\pi$ | 0,05699                        | 0,1909                                        | 0,0484                                            | 0,2387                                   |
| $n = 5$                   | $\pi$  | 0,13790                        | 0,3430                                        | 0,5746                                            | 0,3713                                   |
|                           | $2\pi$ | 0,03447                        | 0,1724                                        | 0,0718                                            | 0,1857                                   |
| Эквивалентное управление  |        |                                |                                               |                                                   |                                          |
| $n = 5$                   | $2\pi$ | 0,03447                        | 0,20005                                       | 0,0823                                            | 0,1857                                   |

#### Алгоритм эквивалентного преобразования.

Рассматривается алгоритм эквивалентной (в первом приближении) замены реверсионного конструируемого управления новой аналитической функцией. В [12] такое преобразование осуществлялось при использовании исходной функции со степенью полинома  $n = 3$ . Теперь представляет интерес использование алгоритма, когда  $n = 5$ .

Новая аналитическая функция ускорения задана в виде:

$$U_1(t) = A_1 \sin pt + A_2 \sin(2pt), \quad (2)$$

где  $A_1, A_2, p = const$ . Из (2) следует выражение для скорости и перемещения:

$$V_1(t) = \int U_1 dt + C_1, \quad S_1(t) = \int V_1 dt + C_2$$

Постоянные интегрирования  $C_1, C_2$  найдены с использованием начальных условий:

$$S_1(0) = 0, V_1(0) = 0. \quad (3)$$

Из системы уравнений (3) получено:  $A_1 = 0,0928$ ;  $A_2 = 0,1326$ .  
Графики  $U_1(t)$ ,  $V_1(t)$ ,  $S_1(t)$  изображены на Рис.3,4,5.

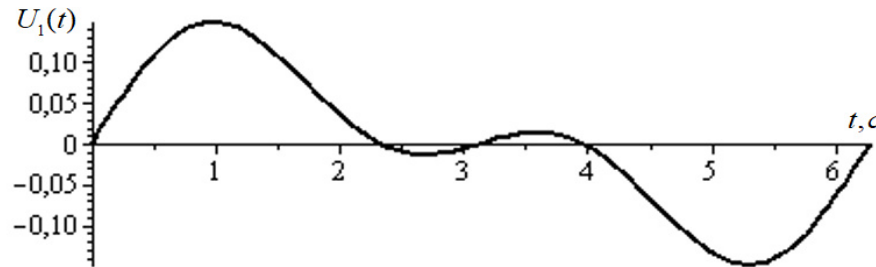


Рис.3 – График ускорения  $U_1(t)$  для эквивалентного управления

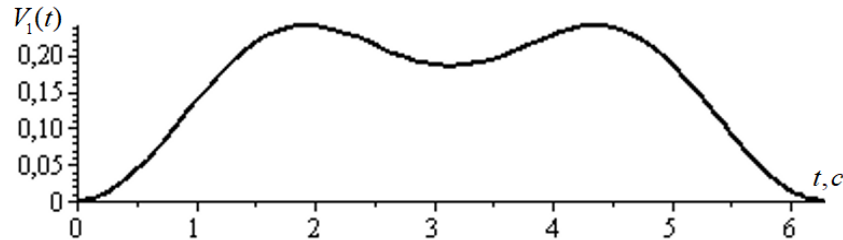


Рис.4 – График скорости  $V_1(t)$  для эквивалентного управления



Рис.5 – График перемещения  $S_1(t)$  для эквивалентного управления

Затрачиваемая энергия  $A = 2 \int_0^{T/2} U_1 V_1 dt = 0,03447$  Дж.

В таблице 1 приведена строка результата эквивалентных преобразований управления  $U_1(t)$ .

#### **Заключение.**

Предложена упрощенная процедура эквивалентной по энергоёмкости замены исходного реверсионно конструируемого управления при ( $n=5$ ) аналитической функцией типа разгон-торможение. Подтверждена экономия энергии при достижении поставленной цели движения.

#### **Библиографический список**

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, Б.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
2. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. / В.Г. Болтянский. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
3. Нетушил А.В. Теория автоматического управления. Ч.II. / А.В. Нетушил. – М.: Высш. шк., 1972. – 432 с.
4. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
5. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
6. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Вища шк., 1982. – 116 с.
7. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
8. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
9. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С-Пб.: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
10. Бохонский А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 1 (351). – С. 15 – 20.
11. Бохонский А.И. Алгоритм конструирования оптимального движения упругого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 4 (348). – С. 33 – 38.
12. Бохонский А.И. Исследование свойств равенства определенных интегралов с различными подынтегральными функциями / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – Севастополь: Изд-во СГУ, 2023. – № 4 (24). – С. 44 – 51.
13. Бохонский А.И. Экспериментальная проверка оптимального управления переносным движением деформируемых объектов / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, Э.О. Балаканов, И.В. Гусаков // Оптимизация производственных процессов. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – № 12. – С. 66 – 72.
14. Бохонский А.И. Экспериментальная проверка оптимального

вращения упругого стержня / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – Севастополь: Изд-во СГУ, 2020. – № 2 (10). – С. 3 – 16.

<sup>1</sup>*Бохонский Александр Иванович, д-р. техн. наук, проф., профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище ордена Красной звезды П. С. Нахимова*

<sup>3</sup>*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., директор колледжа, mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Varinskaya Natalia Ivanovna, candidate of technical sciences, associate professor, head of department, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov*

*Maystrishin Mikhail Mikhaylovich, candidate of technical sciences, associate professor, college director, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДВОДНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Крамарь В.А.<sup>1</sup>, Ермаков И.А.<sup>2</sup>

## DESIGNING AN UNDERWATER ROBOTIC COMPLEX USING A MODEL-ORIENTED APPROACH

Kramar V.A.<sup>1</sup>, Ermakov I.A.<sup>2</sup>

**Аннотация.** Подводные роботизированные комплексы являются наиболее перспективными для решения задач сканирования дна и поиска подводных объектов. Одной из проблем применения таких комплексов является высокий процент их потерь. Это происходит ввиду того, что с комплексом в процессе выполнения миссии нет практически никакой связи, а его поведение не всегда предсказуемо. Чтобы повысить предсказуемость поведения комплекса при выполнении миссии в процессе проектирования следует прибегать к его математическому моделированию, учитывая среду и внутреннюю аппаратуру устройства. Наиболее развитым методом проектирования с использованием математической модели является модельно-ориентированное проектирование, так как модель в данном подходе является основной сущностью. В данной статье рассмотрен процесс модельно-ориентированного проектирования морского роботизированного комплекса, предназначенного для выполнения миссии картографирования и поиска объекта на морском дне.

**Annotation.** Underwater robotic complexes are the most promising for tasks involving seabed scanning and underwater object search. The most commonly used systems for these tasks are autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs). One of the major issues with the deployment of such vehicles is their high loss rate. This occurs because there is virtually no communication with the vehicle during mission execution, and their behavior is not always predictable. To improve system predictability during missions, mathematical modeling of the vehicles should be employed during the design process, taking into account both the environment and the internal equipment of the device. The most advanced design method using mathematical modeling is model-oriented design, as the model in this approach is the primary entity. This paper examines the process of model-based design for an autonomous unmanned underwater vehicle aimed at performing seabed mapping and object search missions. The design process utilizes tools such as Simulink, MATLAB, and CAD software.

**Ключевые слова.** Подводный роботизированный комплекс, проектирование, математическая модель, автономные подводные аппараты.

**Keywords.** Underwater robotic complexes, underwater vehicle design, model-oriented design, autonomous underwater vehicle.

## **Введение.**

Для повышения качества проектирования систем управления подводными роботизированными комплексами, к которым в большинстве своем относятся необитаемые подводные аппараты целесообразно применять модельно-ориентированное проектирование. Этот подход позволяет создавать системы управления и программное обеспечение с использованием физической модели необитаемого подводного аппарата, что качественно улучшает алгоритмы управления, повышает точность, устойчивость и предсказуемость системы. Также данный подход позволяет проводить симуляцию работы необитаемого подводного аппарата в виртуальной среде, что упрощает отладку и сокращает общие издержки на разработку.

Важным аспектом модельно-ориентированного проектирования является создание точной и реалистичной физической модели необитаемого подводного аппарата, которая позволяет провести анализ и оптимизацию системы управления в условиях, максимально приближенных к реальным. Это позволяет обнаружить и устранить возможные проблемы и недостатки заранее, прежде чем они могут привести к непредсказуемому поведению или потере необитаемого подводного аппарата в ходе эксплуатации.

Кроме того, модельно-ориентированное проектирование позволяет легко внедрять новые технологии и инновации в систему управления необитаемого подводного аппарата. Это обеспечивает гибкость и адаптивность системы к изменениям в технологическом процессе и позволяет быстро реагировать на возникающие вызовы и задачи.

В целом, модельно-ориентированное проектирование является эффективным и перспективным подходом к разработке систем управления необитаемого подводного аппарата, который позволяет снизить издержки, повысить качество и безопасность эксплуатации, а также открывает возможности для инноваций и технологического прогресса в этой области.

Модельно-ориентированное проектирование основывается на создании виртуальной модели объекта, в которой прорабатываются ее физические, механические и электрические свойства. Данный подход требует на порядок большего времени на разработку, более сложен и требователен к компетентным специалистам. Однако такой метод позволяет проработать поведение системы, не прибегая к постоянным тестам на реальной системе. На выходе разработанная таким методом система управления является более полноценной и учитывает куда больше параметров системы и среды, в которой эта система работает. Ещё одним минусом модельно-ориентированного проектирования является необходимость в создании достаточного для выполнения поставленных

задач математического описания физических и иных свойств системы, что также кратно усложняет разработку системы управления. Математические модели зачастую требуют точные параметры объекта моделирования, что для некоторых систем требует проведение натурных экспериментов с целью получения точных значений (идентификации) этих параметров.

#### **Математическое описание.**

В работе используется упрощенное уравнение динамики необитаемого подводного аппарата [1,2]. Общее уравнение движения имеет вид:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{BB} + \tau_{ГД} + \tau_{движ},$$

где  $M_{RB}$  – матрица масс твердого тела,  $C_{RB}(v)$  – матрица сил Кориолиса твердого тела,  $\tau_{BB}$  – матрица сил и моментов, создаваемых внешними воздействиями,  $\tau_{ГД}$  – матрица гидродинамических сил и моментов,  $\tau_{движ}$  – матрица сил и моментов двигателей. Подробное описание модели приведено в [3,4,5].

Упор (тяга) и крутящий момент, создаваемые двигателями, имеют сложные нелинейные зависимости, которые зависят от геометрии гребного винта – диаметра, шага, площади лопастей, профиля лопастей, количества лопастей, скорости вращения, скорости притока жидкости и числа Рейнольдса, а также ряда других параметров винтов. Для определения значения коэффициентов упора и момента  $K_t$  и  $K_q$ , а также КПД винта  $\eta_0$  на открытой воде используют кривые эффективности гребных винтов. Для окончательного моделирования гребных винтов двигателей подводного аппарата, используются следующие выражения:

$$T = K_t \rho N^2 D^4, \quad Q = K_q \rho N^2 D^5, \quad J = \frac{V_\alpha}{ND},$$

где  $J$  – коэффициент скорости продвижения,  $T$  – осевая сила тяги гребного винта,  $Q$  – крутящий момент на гребном валу,  $\rho$  – плотность жидкости,  $N$  – скорость вращения гребного винта (об/сек),  $D$  – диаметр гребного винта.

**Модельно-ориентированный подход к разработке необитаемого подводного аппарата.** Модельно-ориентированное проектирование заключается в комплексной проработке всех систем подводного аппарата, начиная с концептуальной проработки необитаемого подводного аппарата, заканчивая проведением натурных испытаний и созданием соответствующей документации. Этот тип проектирования включает в себя следующие этапы: описание требований к системе; разработка архитектуры системы; моделирование необитаемого подводного аппарата; проектирование датчиков и систем связи; разработка системы управления; разработка алгоритмов автономной навигации; симуляция в виртуальной среде; проверка соответствия требованиям; развертывание системы

управления на реальном аппарате; тестирование в реальной среде; документирование и сертификация.

**Описание системы.** Разработка требований начинается с описания в системе проектирования миссии, которую должен выполнить необитаемый подводный аппарат. Для разрабатываемого аппарата миссия состоит в выполнении сканирования морского дна с целью поиска объекта интереса. После обнаружения искомого объекта аппарат должен направиться к нему и сфотографировать область, в которой расположен объект, после чего сообщить данные о его предполагаемом местоположении по гидроакустическому каналу связи.

После фиксации миссии описываются функциональные требования к необитаемому подводному аппарату. Так, например, требования к сенсорам имеют вид: система должна быть способна обрабатывать комбинацию бортовых датчиков для оценки положения подводного аппарата с использованием активных или пассивных средств; система должна иметь бортовые датчики, способные создавать карту морского дна для обнаружения объекта интереса на нем; система должна иметь бортовые датчики, способные обнаруживать препятствия на пути подводного аппарата; система должна быть способна получать команды от станции управления по гидроакустическому каналу связи [6,7].

Логическая архитектура служит для описания системы с точки зрения алгоритмов и интерфейсов. В целом, проектируемая система состоит из трёх основных компонентов: необитаемый подводный аппарат; сеть из нескольких гидроакустических буёв, обеспечивающая связь и позиционирование; центр управления.

На Рис.1 представлена логическая архитектура, определенная в Simulink System Composer.

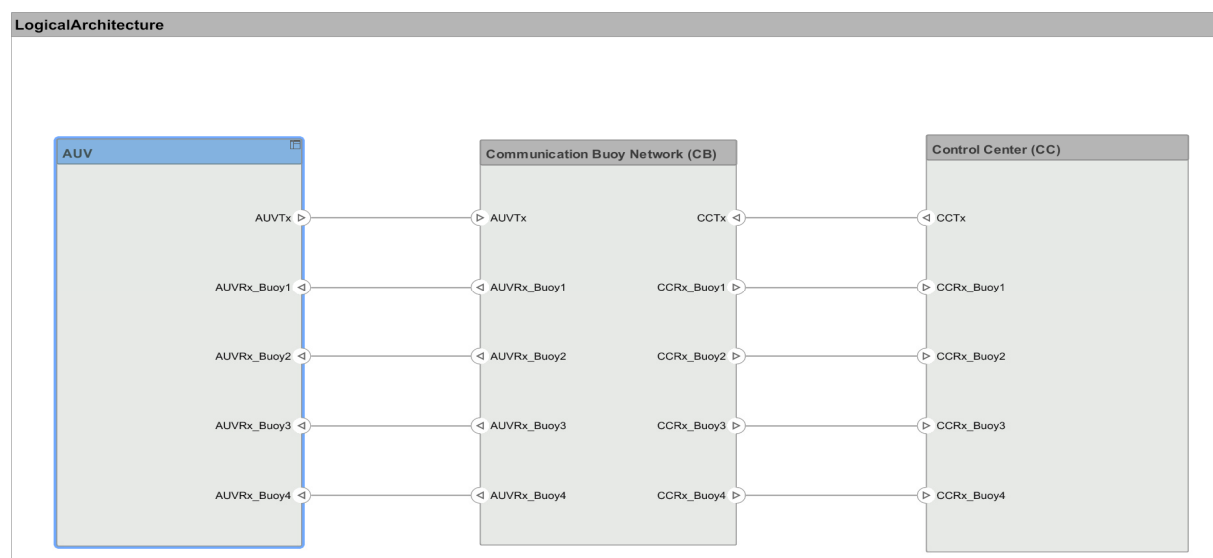


Рис.1 – Логическая архитектура в Simulink System Composer

В свою очередь необитаемый подводный аппарат можно разбить на несколько основных логических компонентов: датчики; приводы и движители; система питания; бортовой вычислитель; система связи (Рис.2). Аналогично детализации подвергается система питания и бортовой вычислитель.

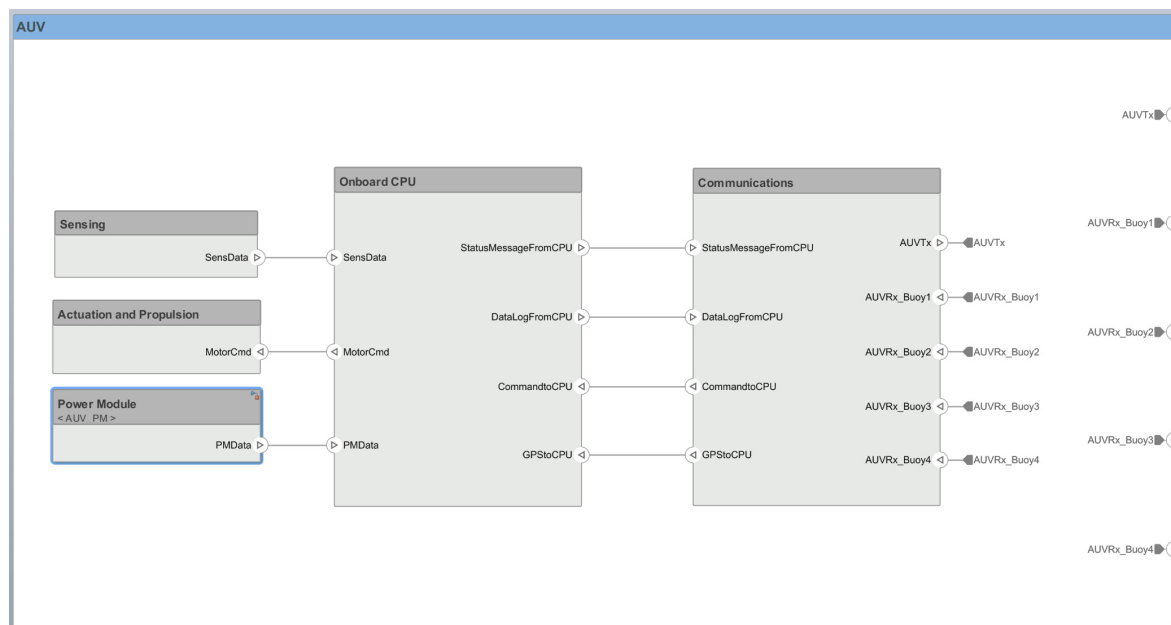


Рис.2 – Описание логической архитектуры в System Composer

Физическая архитектура описывает компоновку необитаемого подводного аппарата на высоком уровне. Необитаемый подводный аппарат на физическом уровне состоит из: датчиков; главного вычислителя; движителя; системы связи. Для реализации определенных требований необитаемый подводный аппарат содержит в себе следующий набор датчиков: система инерциальной навигации; камера; GPS; доплеровский лаг; гидролокатор бокового обзора; антенна связи.

Также для обработки данных с датчиков сенсорная система имеет вычислительный блок, преобразующий сырые данные в более компактный вид. Это необходимо чтобы основной вычислитель не тратил свою вычислительную мощность на вычисление данных с датчиков. Схема системы датчиков представлена на Рис.3.

После описания архитектуры с точки зрения функциональной, логической и физической структуры, необходимо связать все три архитектуры между собой. Это делается при помощи инструмента Allocation в System composer. Данный инструмент представляет собой таблицу, в которой можно задать зависимость компонентов одной архитектуры к другой.

**Разработка с использованием САПР.** Далее необходимо произвести проектирование необитаемого подводного аппарата при

помощи САПР, например, Fusion 360 и Solidworks с целью создания параметрических 3D моделей, включая полезную нагрузку, электронику и остальные элементы. Полученные 3D модели в процессе модельно-ориентированного подхода используются в дальнейшем для построения на их основе математических моделей.

Эскизный проект представлен на Рис.4. В реализации определены габариты, размещены основные элементы (двигатели, ГБО, система акустической связи и камера).

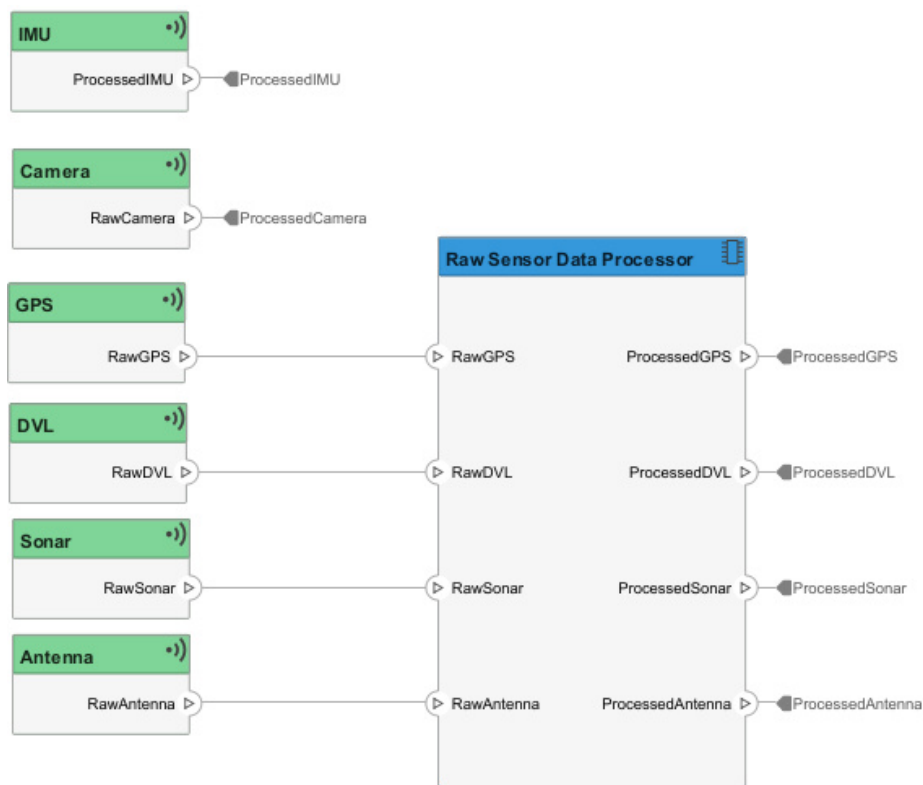


Рис.3 – Описание физической архитектуры системы датчиков в System Composer

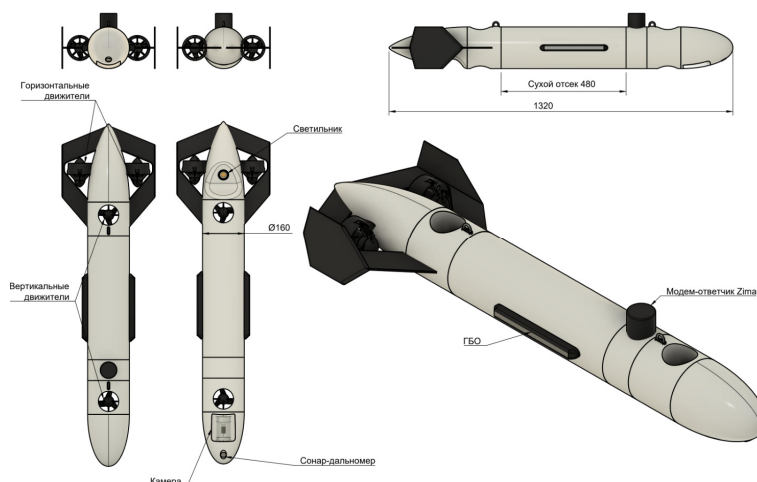


Рис.4 – Разработанный в САПР необитаемый подводный аппарат

**Моделирование.** При помощи САПР SolidWorks и плагина SimScape Multibody, разработанная 3D модель аппарата была преобразована для проведения математического моделирования необитаемого подводного аппарата при помощи Matlab и Simulink. Полную модель необходимо разбить по частям, указав физическое взаимодействие частей аппарата. Для моделирования модель разделяется на подвижные и неподвижные части, корпус и винты (Рис.5).

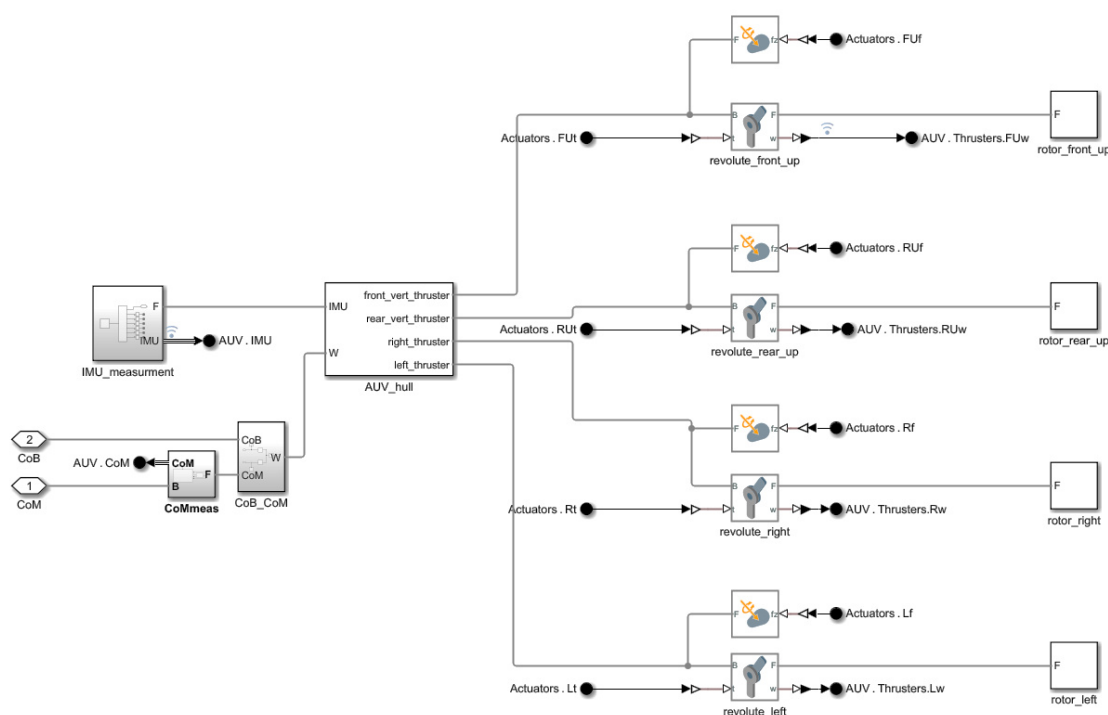


Рис.5 – Подготовленная модель в Simulink

На данном этапе также создаются блоки датчиков положения, датчиков оборотов движителей, и блоки, отвечающие за упор каждого их движителей. Также формируется блок, преобразующий координаты аппарата в координатную нотацию север-восток-низ (NED), задающий центр масс и центр плавучести (Рис.6).

Корпус необитаемого подводного аппарата разделяется по физическим блокам, соответствующим 3D моделям. На них определяются точки крепления движителей, а также каждый блок содержит соответствующую ему полезную нагрузку (Рис.7).

Полученная модель подключается к глобальной точке отсчета. На ней распределяются точки, к которым применяются гидродинамические силы и моменты, а также задается набор камер для дальнейшего отслеживания поведения аппарата при помощи инструментов Simscape.

Блок Hydro Forces & Moments (Рис.8) отвечает за точки, к которым прикладываются силы и моменты, возникающие из-за гидродинамических,

гидростатических эффектов и силы Кориолиса. Он не отвечает за их вычисление, но является частью модели, поскольку силы гидродинамики и гидростатики имеют разные точки приложения.

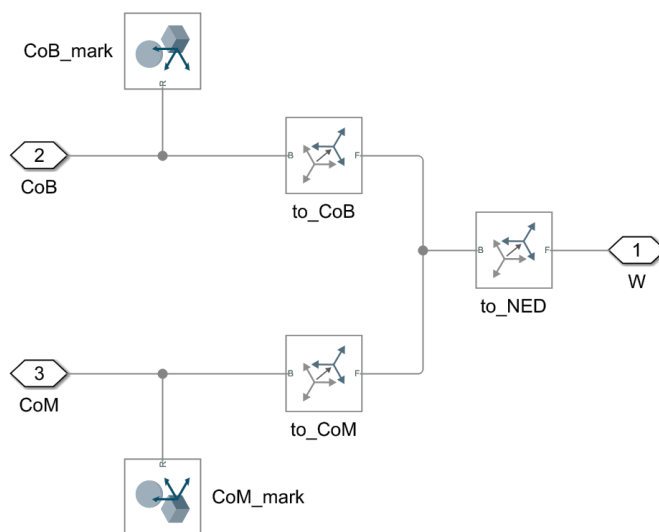


Рис.6 – Блок преобразования координат и задания центров масс и плавучести

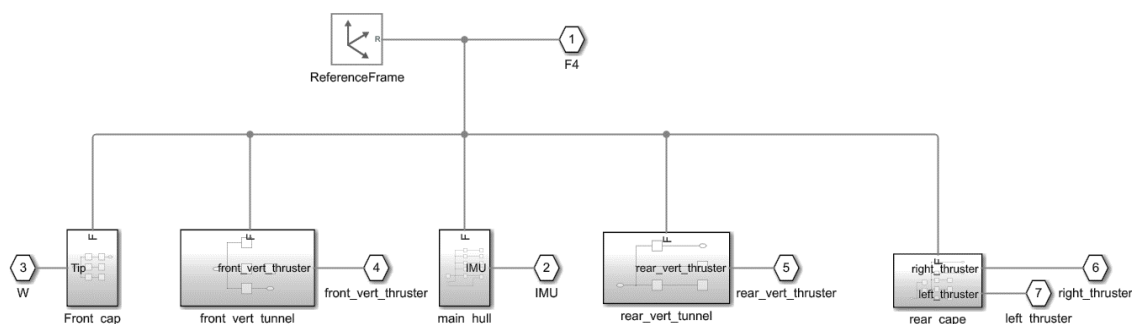


Рис.7 – Модель корпуса в Simulink

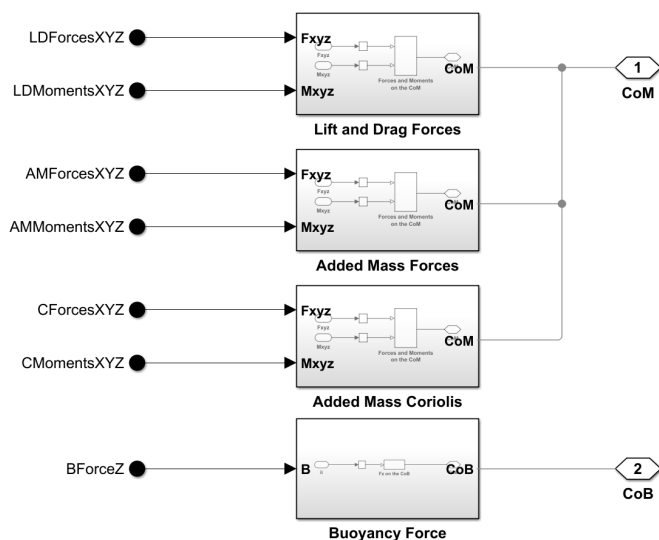


Рис.8 – Блок Hydro Forces & Moments

Формируется Simulink модель гидродинамических и гидростатических сил (Рис.9).

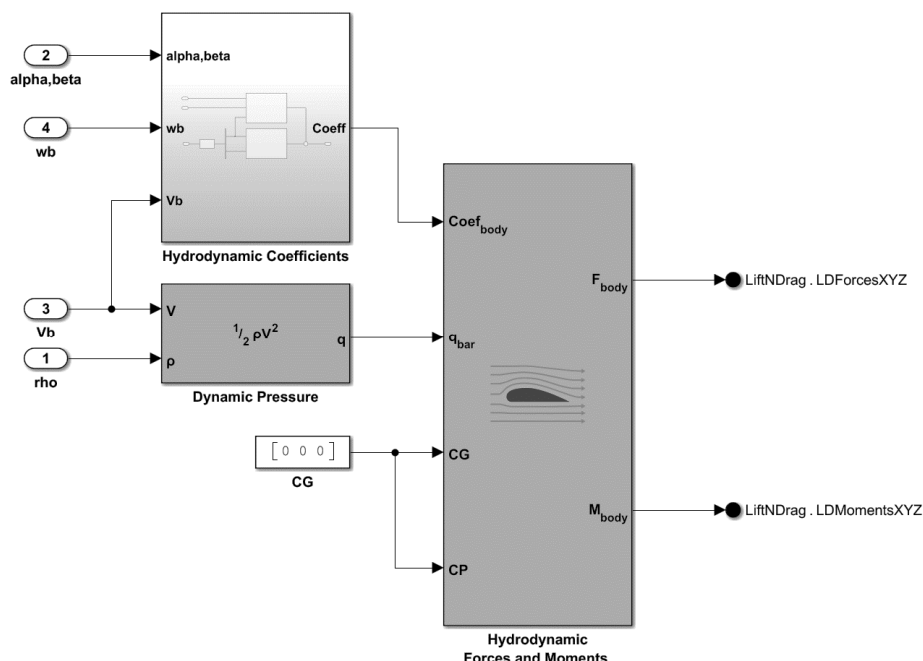


Рис.9 – Модель гидродинамического сопротивления и подъемной силы в Simulink

Входами этой модели являются углы векторов скорости, угловая и линейная скорость аппарата и плотность воды. Для учета силы Кориолиса надо постоянно вычислять вектор ее воздействия на аппарат.

**Система управления.** Синтез системы управления обеспечивает управление по основным осям: продольным движением за счёт маршевых движителей; глубиной и дифферентом; курсовым углом. Все регуляторы реализуются в Simulink и объединяются в единое целое (Рис.10).

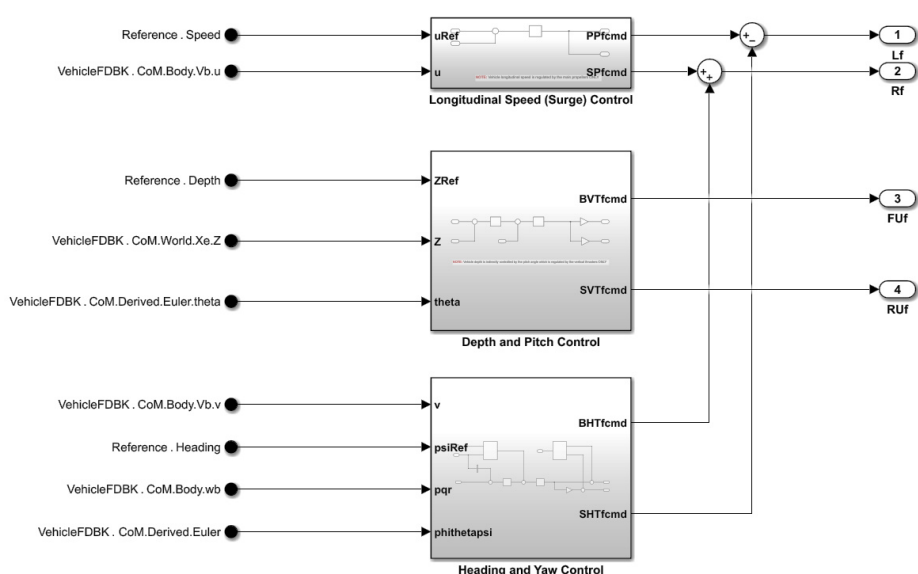


Рис.10 – Система управления

Итоговая модель необитаемого подводного аппарата имеет вид, представленный на Рис.11.

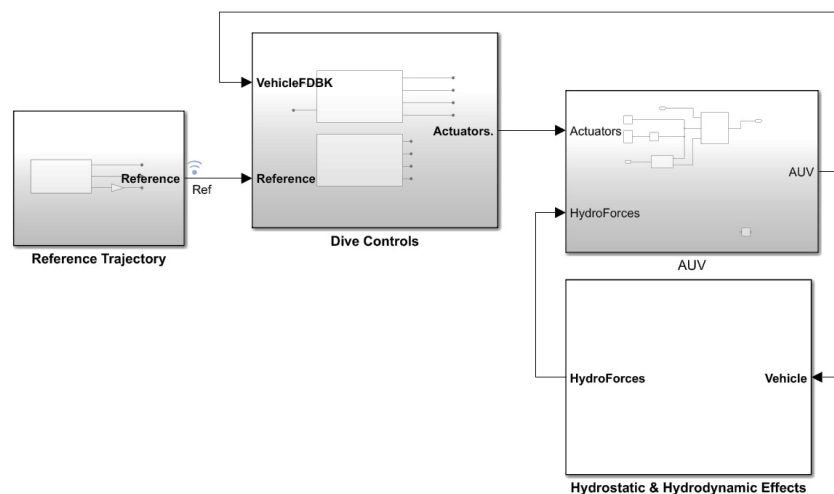


Рис.11 – Итоговая модель подводного аппарата

**Тестирование результатов.** Подводя на вход системы заданные траектории можем симулировать работу необитаемого подводного аппарата, учитывая все разработанные модели. На Рис.12 приведены графики углов Эйлера в режиме отключения контура управления и выбора ненулевых начальных условий, что позволит проверить инерционные свойства и действия гидростатических сил. Как видно из графиков, необитаемый подводный аппарат выравнивается, совершая колебания. Колебания возникают, поскольку на данном этапе не происходит моделирования гидродинамических сил, которые выступали бы демпфером. Наибольшие колебания возникают по дифференту, так как по этой оси плечо сил значительно больше, тогда как по крену плечо сил небольшое и силы гидростатики быстро гасят колебания.

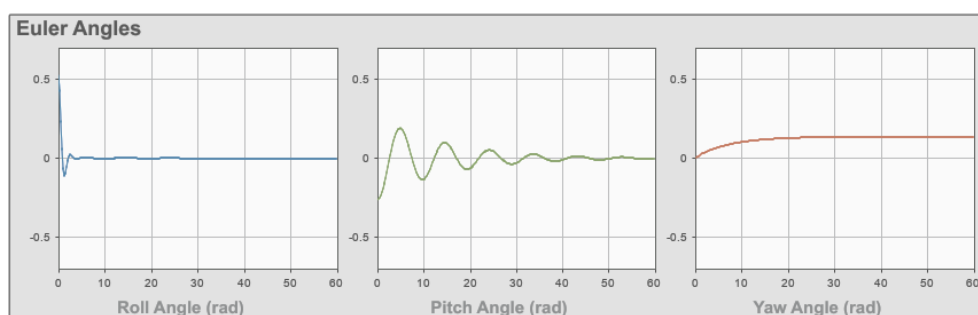


Рис.12 – Углы Эйлера необитаемого подводного аппарата при ненулевых начальных условиях

Моделирование движения необитаемого подводного аппарата с подключенным контуром управления и заданной траекторией погружения по спирали приведено на Рис.13.

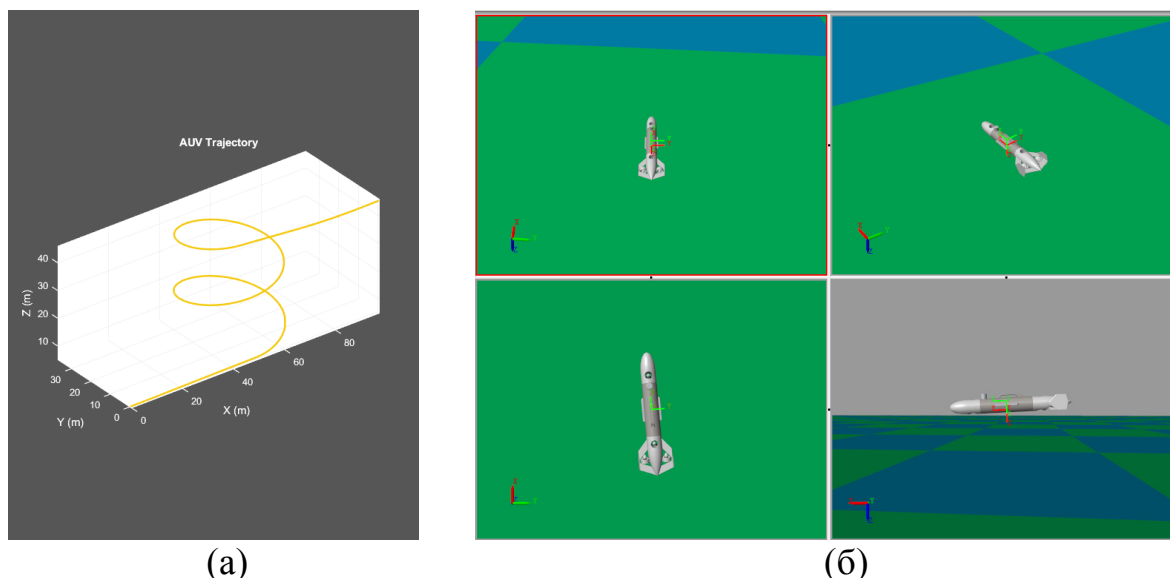


Рис.13 – Моделирование движения необитаемого подводного аппарата по заданной траектории. а) траектория движения; б) ориентация

### **Заключение.**

Рассмотрен модельно-ориентированный подход к проектированию необитаемого подводного аппарата. Основа этого подхода – поэтапное выполнение проработки системы с проверкой ее работоспособности и поведения при помощи математического моделирования. Такой подход позволяет проверить поведение и работоспособность системы до этапов воплощения проекта в реальный образец. Это дает возможность внести соответствующие правки или учесть некоторые аспекты поведения системы.

По итогам проведенных симуляций, можно сделать вывод, что модель подводного аппарата ведет себя предсказуемо и её поведение соотносится с описанной моделью. Полученная система управления также справляется с задачей перемещения модели подводного аппарата по траектории.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2024-0015.

### **Библиографический список**

1. Azis, F.A. Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study / F.A. Azis [et al] // International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, 2012.
2. Eidsvik O.A. Identification of Hydrodynamic parameters for ROVs: master thesis/ O.A. Eidsvik // Trondheim, 2015. – 185 p.
3. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control/ T.I. Fossen// John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 596p

4. Fossen T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles/ T.I. Fossen // New York: Wiley, 1994. – 300p.
5. David Millan A Planar Motion Mechanism (PMM) for Ocean Engineering Studies/ David Millan [et al] // 18th Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference, Canada, 2010.
6. Kebkal K. Practical steps towards establishing an underwater acoustic network in the context of the marine internet of things / K. Kebkal // Applied Sciences (Switzerland) Том 14, 8, April 2024, 3527
7. Кебкал К.Г. Программные подходы для решения задач гидроакустической связи в системах морского интернета вещей / К.Г. Кебкал и др. // Известия ЮФУ. Технические Науки, №: 1 (237), 2024, с. 202-213

<sup>1</sup>*Крамарь Вадим Александрович, д-р. техн. наук, профессор, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Ермаков Игорь Александрович, ermakovigorrov@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Kramar Vadim Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Ermakov Igor Alexandrovich, ermakovigorrov@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ПО ДАННЫМ С ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА МОРСКОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Токарев Д.А.<sup>1</sup>, Кудряшов А.В.<sup>2</sup>, Васильев Д.М.<sup>3</sup>, Тихонов Г.О.<sup>4</sup>

## CONSTRUCTING A MAP BASED ON DATA FROM A SIDE-SCAN SONAR OF A MARINE ROBOTIC COMPLEX

Tokarev D.A.<sup>1</sup>, Kudryashov A.V.<sup>2</sup>, Vasiliev D.M.<sup>3</sup>, Tihonov G.O.<sup>4</sup>

**Аннотация.** В статье описывается методология построения карты дна по данным с гидролокатора бокового обзора. Описаны и проанализированы преимущества и недостатки существующих методов обработки данных с гидролокатора бокового обзора (ГБО). Основное внимание сосредоточено на разработке программного обеспечения и алгоритмов. Приведён пример применения разновидности алгоритма “Slam” для решения поставленной задачи. Предоставлены результаты, полученные путём обработки тестовых данных. Описанный в статье подход обладает большей гибкостью и свободой при планировании маршрута сканирования при помощи гидролокатора бокового обзора. Приведённый метод может быть использован для решения ряда научных и административных задач. Полученные результаты были использованы для построения карты дна поверх существующей карты. Для разработки использован Python. Тестовые данные получены при помощи морского роботизированного комплекса ММТ-300.

**Annotation.** The article describes the methodology for constructing a bottom map based on side-scan sonar data. The advantages and disadvantages of existing methods for processing side-scan sonar data are described and analyzed. The main attention is focused on the development of software and algorithms. An example of using a variation of the “Slam” algorithm to solve the problem is given. The results obtained by processing test data are provided. The approach described in the article has greater flexibility and freedom in planning a scanning route using a side-scan sonar. The presented method can be used to solve a number of scientific and administrative problems. The obtained results were used to construct a bottom map over the existing map. Python was used for development. Test data was obtained using the MMT-300 marine robotic complex.

**Ключевые слова.** Slam, гидролокатор бокового обзора (ГБО), обработка экспериментальных данных; Python, обработка данных, морской роботизированный комплекс.

**Keywords.** Slam, side-scan sonar (SSS), experimental data processing; Python, data processing, marine robotic complex.

**Введение.** Одной из задач, решаемой подводной робототехникой, является исследование морского дна, которое позволяет обнаруживать объекты, находящиеся на большой глубине, получать информацию о рельефе дна, упрощает и делает возможным решение ряда важных научных и административных задач, таких как:

- Картография;
- Поисковые операции;
- Обеспечение безопасности судоходства;
- Инженерные, гидрологические и экологические изыскания;
- Изучение придонной флоры и фауны;
- Подводная археология;
- Научные исследования.

Один из способов исследования морского дна – гидролокация. Пример сканирования дна приведен на Рис.1,2 [8,9]. Морской роботизированный комплекс или любое другое судно с установленным или буксируемым гидролокатором бокового обзора (ГБО) движется по заданной траектории и сканирует дно.

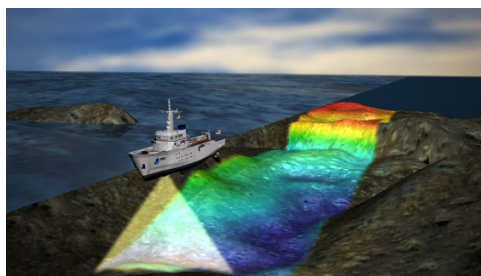


Рис.1 – Сканирование дна надводным судном

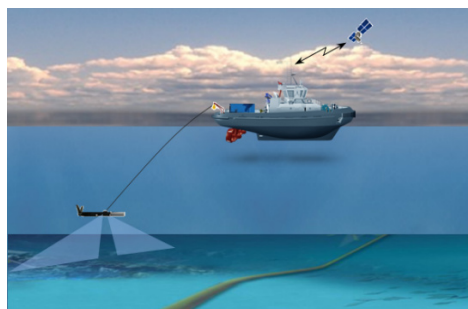


Рис.2 – Сканирование дна буксируемым подводным гидролокатором

После выполнения сканирования ставится задача интерпретации полученных данных. Таких как: поиск объектов, разведка ресурсов, поиск трубопроводов, построение карты поверхности дна. Частный случай интерпретации, рассматриваемый в этой работе, – построение карты дна.

На текущий момент аппарат, выполняющий сканирование дна, должен двигаться прямолинейно, не меняя курса. В случае смены курса, получаемые данные невозможно интерпретировать в необработанном виде. Получаемые путём сканирования данные не имеют

пространственной привязки, вследствие чего теряется целостность картинки, появляются искажения. Существующее программное обеспечение (ПО) не имеет функционала, позволяющего выполнить необходимые преобразования. В данной работе будут рассмотрены методы преобразования строк сканирования изображения ГБО с учетом нелинейной траектории движения подводного роботизированного комплекса.

Полученные результаты наложены на карту с учетом GPS координат, собранных во время работы подводного роботизированного комплекса (ПРК) ММТ-300.

### **Подготовка экспериментальных данных.**

Для выполнения экспериментальной части и сбора данных использовался ПРК ММТ-300. Результатом сбора данных стали 2 файла. Файл, содержащий строки сканирования ГБО, состоит из заголовка и данных сканирования. Заголовок содержит общие данные об эксперименте – например, количество строк сканирования, количество столбцов в одной строке, время начала эксперимента, сдвиг данных в байтах относительно начала. Используя указанный в заголовке сдвиг, количество строк и столбцов данных сможем приступить к чтению данных из файла. Второй файл содержит в себе навигационные данные аппарата в json [10] формате. Навигационные данные представляют из себя массив объектов, где каждый объект – это состояние подводного комплекса в момент времени. Под состоянием подразумеваются следующая информация: курс, скорость, координаты, крен, глубина погружения и т.п.

После выполнения сбора данных реализуем программу, которая считывает данные из файлов для последующей обработки. Поскольку описание чтения данных из файла в данном случае задача тривиальная, то сразу перейдем к результату. Считав данные из файла, воспользуемся библиотекой matplotlib [2] и изобразим полученную матрицу данных на Рис.3, где интенсивность пикселя – это мощность отраженного сигнала.

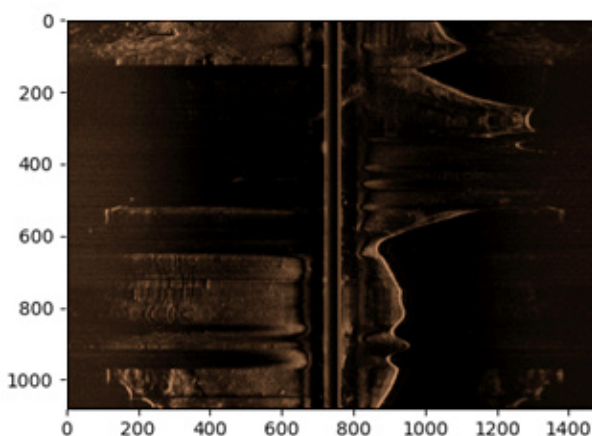


Рис.3 – Визуализация данных ГБО

На приведенном рисунке вертикальная ось отображает номер строки сканирования, а элементы строки сканирования расположены горизонтально.

Поскольку на полученном изображении с трудом можно разглядеть даже мощный сигнал, то выполним гистограммную эквализацию данных для улучшения визуальных качеств изображения. Гистограммная эквализация – это метод улучшения качества изображения с помощью усиления контраста отдельных областей [7]. Результат применения метода представлен на Рис.4.

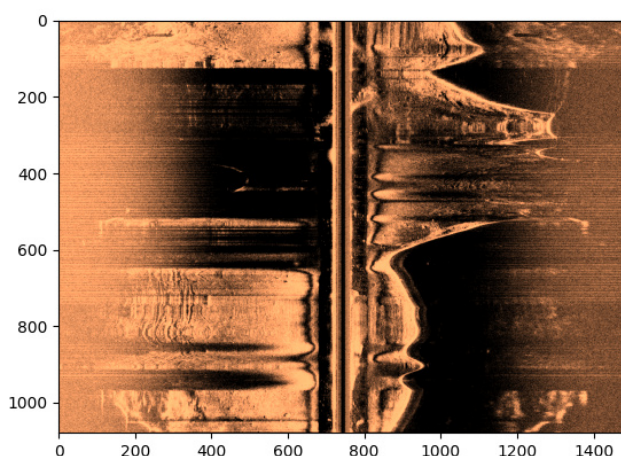


Рис. 4 – Визуализация данных ГБО после гистограммной эквализации

Данные сканирования получены так, как если бы комплекс двигался по прямой. Для построения карты дна необходимо совместить полученные данные с нелинейной траекторией движения ПРК. Для этого необходимо получить доступ к навигационным данным. Таким образом, станет известно, как нужно расположить каждую из строк сканирования в пространстве, чтобы они соответствовали положению комплекса в момент получения строки.

Для получения траектории движения ПРК воспользуемся json файлом, который содержит навигационные данные. Для считывания воспользуемся стандартной json библиотекой python. Считываем навигационные данные и строим траекторию движения аппарата (Рис.5).

На Рис.5 вертикальная и горизонтальная оси отображают дистанцию в метрах. Отрицательные значения на Рис.5 появляются вследствие использования декартовой системы координат.

Далее совмещаем траекторию и результаты сканирования. Для совмещения приведем данные в одну систему координат. Воспользуемся физическим размером одной выборки в строке, которую получили из заголовка ранее, и переведем траекторию в матричную систему координат. В данном случае один пиксель эквивалентен 0.00579003 метрам. Результат представлен на Рис.6.

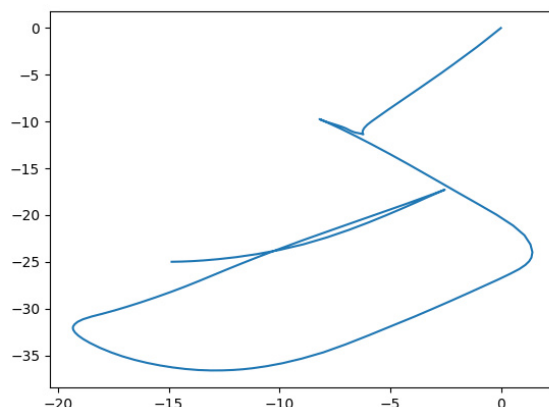


Рис.5 – Траектория движения аппарата в метрах

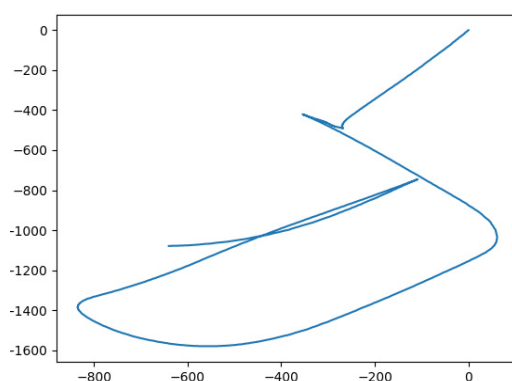


Рис.6 – Траектория движения МРК в матричных координатах

Далее для удобства разработки объединяем навигационные данные и данные сканирования в один объект. Такое решение отразится на производительности программы, реализующей алгоритм в худшую сторону, однако оптимизация вычислений в текущем исследовании не рассматривается и является перспективой для дальнейших исследований.

**Обработка экспериментальных данных.** Используем навигационные данные для определения положения строк сканирования в пространстве. Для каждого пикселя на Рис.4 находим его истинное местоположение с учетом GPS координат. Преобразование положения точек Рис.4 выполняется вращение и смещение строк так, чтобы они соответствовали траектории движения МРК.

Обработка экспериментальных данных выполняется следующим образом.

#### А. Вращение.

Принимая во внимание то, что сканирующий аппарат всегда находится в центре строки сканирования, выполняем вращение каждой строки относительно её центра. Поскольку известно, какой курс МРК держал в каждый момент сканирования строки, то известно на какой угол необходимо совершить вращение.

В данном случае значения пикселей не важны, интерес представляют только их индексы. Для вращения точек относительно центра строки применяется формула вращения вектора [4].

$$\dot{x} = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha),$$

$$\dot{y} = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha),$$

где  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  – координаты вектора после вращения,  $x$ ,  $y$  – координаты вектора,  $\alpha$  – угол поворота. При этом начало вектора будет располагаться в центре строки матрицы, а конец вектора будет расположен в точке нахождения вращаемого пикселя. Для каждого пикселя в строке вычисляем новое пространственное положение.

#### В. Смещение.

Для выполнения смещения достаточно знать координаты МРК в момент сканирования. Координаты МРК получены ранее, поэтому смещаем каждый пиксель строки на величину  $x$ ,  $y$  и получаем нужный результат, где  $x$ ,  $y$  – это расстояния от точки начала эксперимента в метрах.

#### С. Вычисление нового размера.

При вращении матрицы значений ГБО, ее размерность изменяется, что приводит к необходимости вычисления нового размера матрицы; используя информацию о смещении и вращении, находим максимальный и минимальный индексы новой конфигурации данных. Из каждого индекса вычитаем с присваиванием минимальное значение индекса – таким образом минимальным индексом станет «0». После этого вычисляем максимальный индекс – это новый размер изображения.

#### Д. Заполнение.

Выше описано получение смещения для каждого пикселя и новый размер изображения, с учетом этого, переходим к формированию нового изображения с учетом всех полученных данных. Каждый пиксель переносим на новый индекс в новом изображении. Результат представлен на Рис.7.

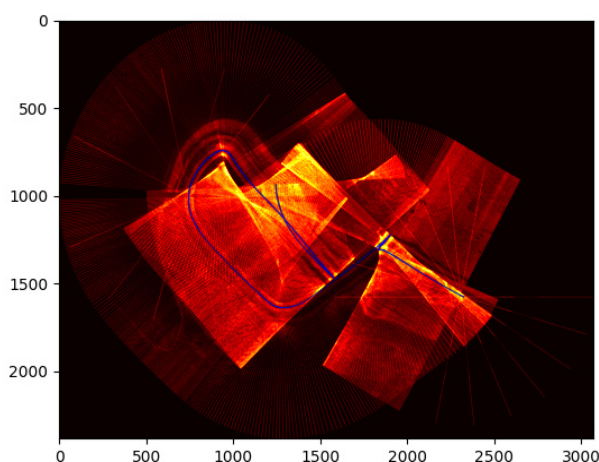


Рис.7 – Результат трансформации данных ГБО

### Наложение обработанных данных на GPS карту.

После того как преобразование данных выполнено, следующий этап – это наложение полученного результата на карту с учетом GPS координат. В дополнение к увеличению информативности карты это позволит проверить достоверность полученных результатов.

#### А. Наложение на карту.

Для получения карты используем Python библиотеку «Folium» [6].

Для начала делаем запрос на получение фрагмента карты в окрестности эксперимента. Накладываем траекторию эксперимента на полученную карту (Рис.8,9).

#### В. Преобразование координат.

Установив корректность работы программы, переходим к наложению преобразованных данных. Для наложения данных необходимо вычислить мировые координаты углов прямоугольника, описывающего карту изображенную на Рис.7. Поскольку эта карта построена в матричных координатах, то сначала преобразуем матричные координаты в метры, используя известный из экспериментальных данных коэффициент преобразования. Следующим шагом преобразуем координаты из метрической системы в градусы широты и долготы по формулам 1, 2.

$$E = d * \frac{1}{111111.0}, \quad (1)$$

$$S = d * \frac{1}{111111.0 * 0.7}, \quad (2)$$

где  $E$  – градус восточной долготы,  $S$  – градус северной широты,  $d$  – расстояние в метрах.

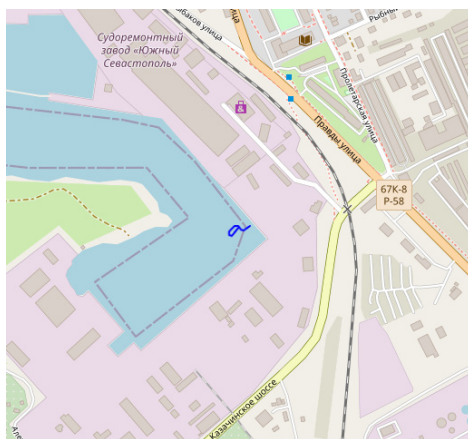


Рис.8 – Фрагмент карты в окрестности эксперимента в отдалении

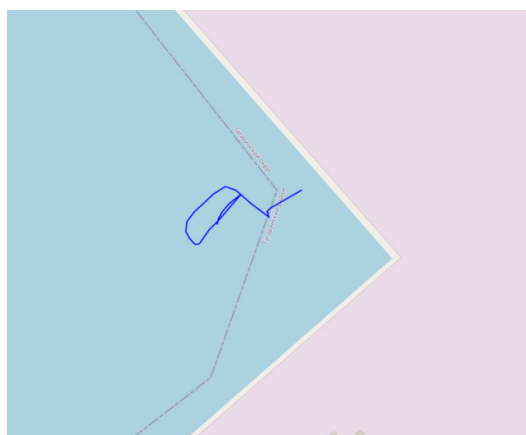


Рис.9 – Фрагмент карты в окрестности эксперимента в приближении

С. Наложение данных.

Выполнив преобразование в мировую координатную систему, можно приступить к наложению данных. Результат наложения представлен на Рис.10.

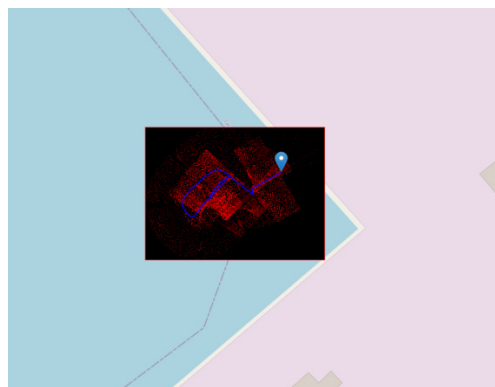


Рис.10 – Наложение данных на GPS карту

Сделаем черные пиксели прозрачными, поскольку они не несут полезной информации (Рис.11).

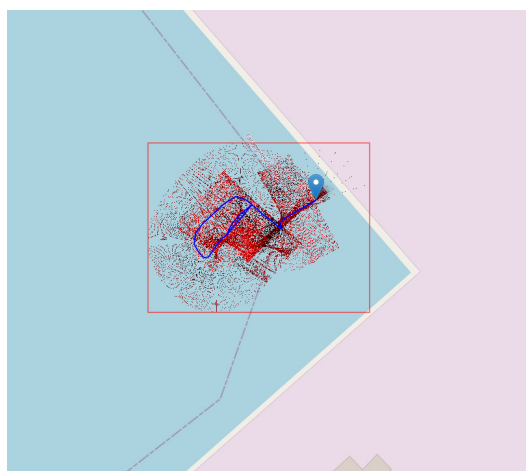


Рис.11 – Наложение данных на GPS карту. Чёрные пиксели с увеличенным параметром прозрачности

### **Заключение.**

Итогом работы стал метод построения карты дна акватории по преобразованным данным ГБО. Такая карта может быть полезна при решении административных и научных задач. В дальнейшем планируется получение дополнительных экспериментальных данных для апробации метода. Так же планируется использование иных подходов к визуализации карты в соответствии с конкретной постановкой задачи.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2024-0015.

### **Библиографический список**

1. Гидролокация, [Электронный ресурс] , booksite : [сайт]. — URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/010/271.htm> (дата обращения: 10.01.24).
2. Библиотека matplotlib , [Электронный ресурс] , matplotlib : [сайт]. — URL: <https://matplotlib.org> (дата обращения: 10.01.24).
3. Reading binary files in Python , [Электронный ресурс] , geeksforgeeks : [сайт]. — URL: <https://www.geeksforgeeks.org/reading-binary-files-in-python/> (дата обращения: 10.01.24).
4. Formula for rotating a vector in 2D , [Электронный ресурс] , matthew-brett.github.io : [сайт]. — URL: [https://matthew-brett.github.io/teaching/rotation\\_2d.html](https://matthew-brett.github.io/teaching/rotation_2d.html) (дата обращения: 10.01.24).
5. Colormaps , [Электронный ресурс] , matplotlib : [сайт]. — URL: <https://matplotlib.org/stable/users/explain/colors/colormaps.html> (дата обращения: 10.01.24).
6. Folium documentation , python-visualization URL: <https://python-visualization.github.io/folium/latest/> (дата обращения: 19.04.2024).
7. Эквализация гистограмм для повышения качества изображений , habr URL: <https://habr.com/ru/articles/244507/> (дата обращения: 19.04.2024)
8. Буксируемый гидролокатор бокового обзора / [Электронный ресурс] / Центр СКО : [сайт]. — URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/buksiruemyy-gidrolokator-bokovogo-obzora> (дата обращения: 29.05.2024).
9. Что такое гидролокатор? / [Электронный ресурс] / MARINEQ : [сайт]. — URL: <https://seacomm.ru/dokumentaciya/stati/chto-takoe-gidrolokator/> (дата обращения: 29.05.2024).
10. JavaScript Object Notation / [Электронный ресурс] / JSON : [сайт]. — URL: <https://www.json.org/json-ro.html> (дата обращения: 29.05.2024).

<sup>1</sup>Токарев Денис Александрович, канд. техн. наук, Tdanis@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

<sup>2</sup>Кудряшов Арсений Валерьевич, monsterkakes@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

<sup>3</sup>Васильев Денис Михайлович, den.vas.84@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

<sup>4</sup>Тихонов Георгий Олегович, ygorgik18@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

*Tokarev Denis Alexandrovich, candidate of technical sciences, Tdanis@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Kudryashov Arseniy Valerievich, monsterkakes@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Vasilev Denis Mikhailovich, den.vas.84@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Tikhonov Georgy Olegovich, ygorgik18@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## МЕТОД КОРРЕКЦИИ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ ДАТЧИКОВ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ ДАННЫМ В ЗАДАЧЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КАРЕТКИ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Ляшко А.Д.<sup>1</sup>, Дементьев К.В.<sup>2</sup>

## THE METHOD FOR TIME OF-FLIGHT SENSOR CORRECTION BASED ON VISUAL DATA IN THE CARRIAGE POSITIONING PROBLEM WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

Liashko A.D.<sup>1</sup>, Dementiev K.V.<sup>2</sup>

**Аннотация.** В статье рассматривается метод коррекции показаний времяпролетных датчиков, используемых для точного позиционирования каретки с двумя степенями свободы. Предложен алгоритм полиномиальной коррекции с фильтрацией Калмана, основанный на визуальном референсе, который позволяет значительно повысить точность позиционирования. Метод основан на сравнении текущего положения каретки с заранее заданным визуальным референсом и последующей корректировке показаний датчиков для минимизации ошибки позиционирования. Статья представляет интерес для исследователей и инженеров, занимающихся разработкой систем позиционирования с высокой точностью. Экспериментальная часть проводилась в научно-исследовательской лаборатории СевГУ. Полученные результаты подтвердили работоспособность алгоритма.

**Annotation.** The article considers a method for time-of-flight sensor readings correction used for precise two degree of freedom carriage positioning. A polynomial correction with Kalman filtration algorithm based on a visual reference is proposed, which allows to significantly improve the positioning accuracy. The method is based on the comparison of the current carriage position with a predetermined visual reference and the subsequent sensor readings correction to minimize the positioning error. The article presents interest for researchers and engineers dealing with the high-accuracy positioning systems development. The experimental stage was carried out in the SevSU research laboratory. The obtained results confirmed the algorithm operability.

**Ключевые слова.** Времяпролетные датчики, визуальное позиционирование, системы управления, коррекция ошибки, оценка положения.

**Keywords.** Time-of-flight sensors, visual positioning, control systems, error correction, position estimation.

**Введение.** В современном мире автоматизации и высоких технологий точное позиционирование играет ключевую роль во многих отраслях промышленности. Одним из ключевых компонентов систем позиционирования являются времяпролетные датчики, которые обеспечивают высокую точность и скорость измерений [1,2]. Однако, несмотря на все преимущества, времяпролетные датчики могут столкнуться с проблемами точности из-за внешних факторов, таких как изменение условий окружающей среды или износ оборудования [3].

В данной статье предлагается метод коррекции времяпролетных датчиков на основе визуальных данных, который позволяет значительно повысить точность позиционирования каретки приводов. Метод основан на интеграции визуальной информации с данными, полученными от времяпролетных датчиков, что позволяет компенсировать ошибки и обеспечить более точное позиционирование.

**Целью данной работы** является разработка и исследование метода коррекции времяпролетных датчиков (ToF) с использованием визуальных данных, а также оценка его эффективности в задаче позиционирования каретки приводов. В ходе исследования будут рассмотрены основные принципы работы датчиков, проанализированы существующие методы коррекции и предложен новый подход на основе визуальных данных. Ожидается, что результаты исследования позволят улучшить точность позиционирования каретки приводов, что в свою очередь повысит эффективность производственных процессов и снизит риск возникновения ошибок.

**Описание объекта исследования.** В качестве объекта исследования рассмотрен прототип складского шкафа, схема которого приведена на Рис.1.

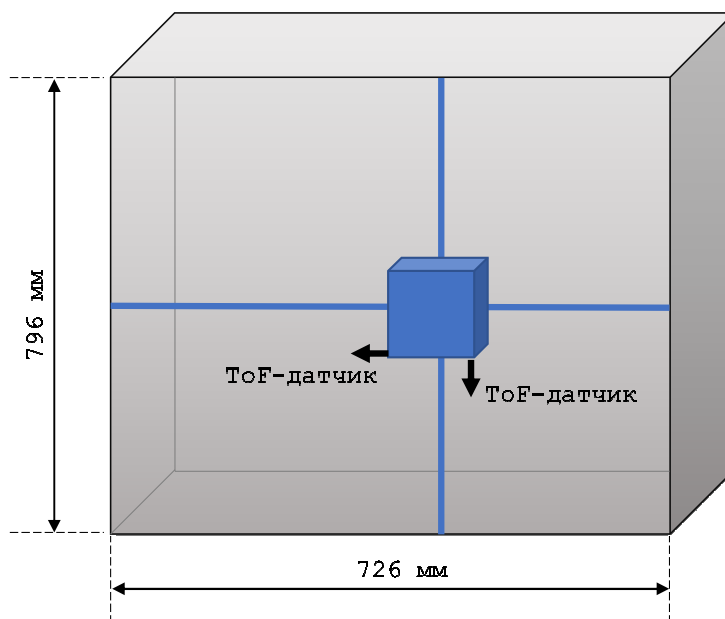


Рис.1 – Схема прототипа складского шкафа

Состоит он из жесткой рамы, обеспечивающей основу для системы, линейных приводов, расположенных перпендикулярно друг другу, подвижной каретки, способной перемещаться в двух направлениях и рельсовых направляющих. Система управления прототипа обеспечивается отладочной платой «NodeMCU-32» на базе высокопроизводительного чипа «ESP-32S WIFI» + Bluetooth («ESP-WROOM-32»). Основные характеристики платы:

1. Чип ESP-32S: основой платы является высокопроизводительный чип ESP-32S, который обеспечивает поддержку Wi-Fi в стандартах 802.11 b/g/n/e/i и Bluetooth 4.2. Это позволяет создавать устройства с возможностью подключения к интернету и обмена данными с другими устройствами через Wi-Fi и Bluetooth.

2. Память: плата оснащена встроенной памятью, которая может использоваться для хранения программ и данных. Это упрощает разработку и тестирование проектов.

3. Интерфейсы: плата имеет несколько интерфейсов, включая GPIO, UART, I2C, SPI, что позволяет подключать различные датчики и исполнительные механизмы.

4. Питание: плата поддерживает питание от USB или внешнего источника питания через разъем DC. Это делает её гибкой в использовании и позволяет применять в различных проектах.

5. Размеры: компактные размеры платы (около 6х3 см) делают её удобной для встраивания в различные устройства.

6. Среда разработки: для программирования платы используется среда разработки Arduino IDE, что упрощает процесс разработки и делает его доступным для начинающих.

7. Совместимость: плата совместима с различными модулями и датчиками, что позволяет расширять функциональность проектов.

Эти характеристики делают отладочную плату «NodeMCU-32» на базе ESP-32S отличным выбором для разработки систем управления с возможностью подключения различных датчиков и исполнительных механизмов. Для управления приводами используется два драйвера BTS7960 IBT-2 43A (Рис.2) рассчитанных на напряжение от 5,5 до 27,5 В постоянного тока до 43 А.

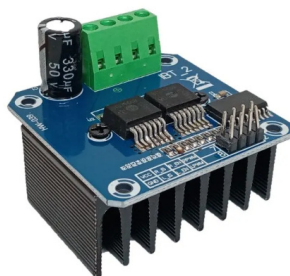


Рис.2 – Драйвер BTS7960 IBT-2

С помощью данного драйвера можно управлять скоростью привода, направлением его движения, выполнять торможение и контролировать нагрузку логическими уровнями ШИМ.

Главными источниками информации в контуре управления являются времяпролетные датчики VL53L0X, установленные на каретке прототипа по схеме на Рис.3 и позволяющие излучать невидимый лазерный луч и измерять время его возврата после отражения от объекта [2].

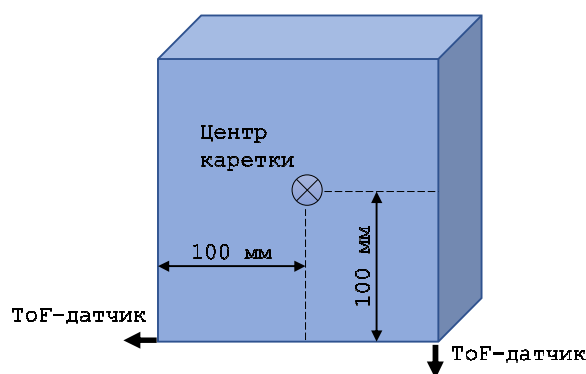


Рис.3 – Схема расположения ToF-датчиков на каретке

Основные характеристики используемого датчика в контексте данной задачи приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики VL53L0X [4]

| Параметр                         | Описание                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| диапазон измерения               | от 30 мм до 2000 мм (2 метра)<br>оптимальный рабочий диапазон: 50 – 1200 мм                                                                                                    |
| точность измерения               | $\pm 3\%$ на расстоянии до 2 метров<br>до $\pm 1$ мм при калибровке на определенном диапазоне                                                                                  |
| скорость измерения               | до 50 Гц (20 мс на измерение)<br>возможность настройки времени измерения                                                                                                       |
| размеры                          | компактный размер: 2.4 x 4.4 x 1.0 мм                                                                                                                                          |
| интерфейс                        | I2C для подключения к микроконтроллеру<br>программируемый I2C адрес                                                                                                            |
| энергопотребление                | около 20 мВт в активном режиме<br>режим энергосбережения                                                                                                                       |
| особенности для позиционирования | не зависит от цвета и отражающей способности поверхности (в отличие от ИК-датчиков)<br>узкий угол обзора ( $25^\circ$ ) для точного определения расстояния до конкретной точки |
| устойчивость к внешним факторам  | работает при освещенности до 100 клк<br>диапазон рабочих температур: $-20^\circ\text{C}$ до $+70^\circ\text{C}$                                                                |

Использование VL53L0X для позиционирования каретки позволяет достичь высокой точности измерения расстояния, что критично для точного позиционирования. Его компактность, скорость работы и простота интеграции делают его отличным выбором для данной задачи.

#### **Особенности задачи.**

Использование времяпролетных датчиков сопряжено с рядом проблем, связанных с погрешностью их измерений. Основные причины ошибок времяпролетных датчиков [1,3]:

1. Температурный дрейф: изменение характеристик датчика при изменении температуры окружающей среды.
2. Многолучевое распространение: отражения сигнала от нескольких поверхностей, приводящие к ошибкам в измерении расстояния.
3. Неоднородность отражающих поверхностей: различные материалы и текстуры могут по-разному отражать сигнал, вызывая ошибки.
4. Внешние источники помех: электромагнитные помехи и засветка от других источников излучения.
5. Нелинейность характеристик: отклонение от линейной зависимости между измеряемым расстоянием и временем пролета сигнала.
6. Ограничения по разрешающей способности: конечная точность измерения времени пролета сигнала.
7. Дрейф параметров компонентов: изменение характеристик электронных компонентов датчика со временем.

#### **Обзор существующих методов.**

Существует множество способов борьбы с описанными ранее проблемами. Основные подходы к коррекции показаний ToF-датчиков базируются на их калибровке, которая может значительно улучшить точность измерений, но требует дополнительного оборудования и времени, а также не учитывает динамические изменения в окружающей среде [5].

Фильтрация данных представляет собой альтернативный подход, который может работать в реальном времени и не требует дополнительного оборудования, хотя эффективность напрямую зависит от выбора параметров фильтра [6].

Машинное обучение и нейронные сети также применяются для потенциально качественной коррекции показаний, учитывая сложные нелинейные зависимости, однако требуют большого объема обучающих данных и могут быть вычислительно затратным для работы в реальном времени [7].

Комбинированные методы коррекции могут объединять сильные стороны различных подходов и как правило наиболее эффективны, но при

этом могут быть сложны в реализации и требуют тонкой настройки для конкретных условий применения [8].

**Предлагаемый метод.** В настоящей работе предложен подход, основанный на сравнении измерений датчиков с референсом, пересчитанным по данным камеры «PlayStation 5 HD» (Рис.4) с разрешением 1080P (1920x1080 пикс.) при рабочей частоте 30 кадров в секунду.



Рис.4 – Камера «PlayStation 5 HD»

Предполагается получение изображений с камеры и поиск координаты точки  $m(x,y)$  в локальной системе координат, которая определяется рабочей областью складского шкафа. По позициям пикселей изображения  $x$  и  $y$  необходимо получить координаты  $m$  в метрической системе (Рис.5).

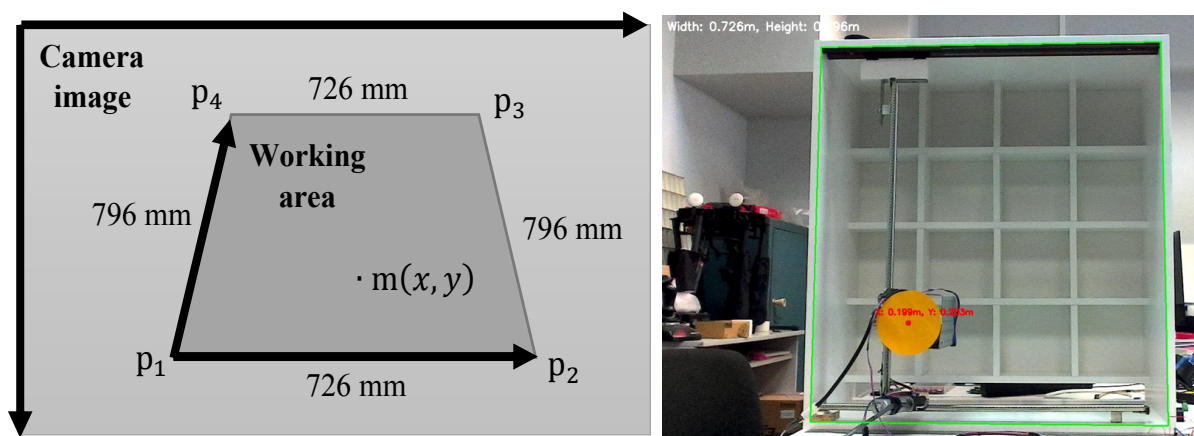


Рис.5 – Изображение систем координат и прототипа стенда

Процедура нормализации точек полигона рабочей области:

$$s \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = T_P \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $s$  – коэффициент масштабирования,  $T_P$  – матрица трансформации перспективы [9], которая формируется по точкам нормализованных координат  $\{(0,0), (1,0), (1,1), (0,1)\}$  и точкам полигона рабочей области  $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ .

Пусть желаемое положение точки внутри локальных координат рабочей области в метрах определяется как  $s$   $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$ , тогда

$$\begin{cases} \mathbf{x} = (1/s)\mathbb{W}x', & (x'/s) \in [0; 1], \\ \mathbf{y} = (1/s)\mathbb{H}y', & (y'/s) \in [0; 1], \end{cases}$$

где  $\mathbb{W}$  и  $\mathbb{H}$  – заранее известные ширина и высота рабочей области (в данном контексте складского шкафа).

Схема подключения устройств для обмена данными при проведении эксперимента приведена на Рис.6 и состоит из камеры и двух ToF-датчиков, дальности которых передаются от ESP32-микроконтроллера по UART-каналу со скоростью 115200 бод на рабочий компьютер оператора.

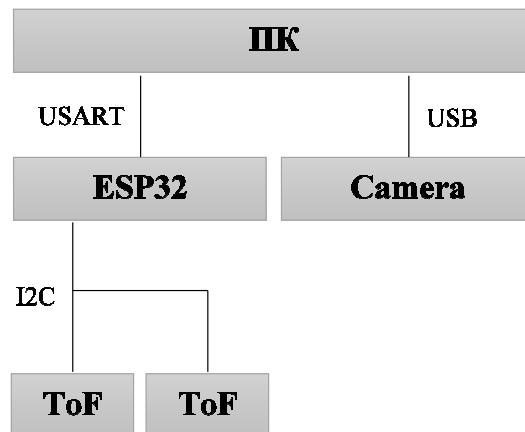


Рис.6 – Схема обмена данными в эксперименте

Для визуального распознавания центра каретки по данным камеры будет использован подход, предложенный в работе [10,11]. Обнаружение цели на изображении, полученного с видеокamеры (Рис.7) осуществляется по цвету с выделением контура найденного объекта.

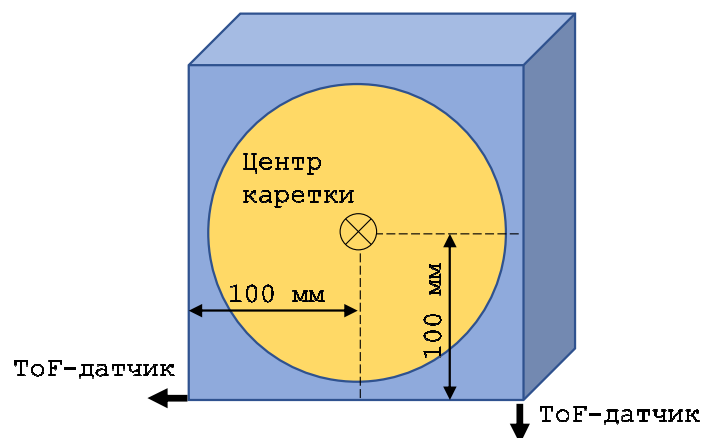


Рис.7 – Распознаваемый объект

В качестве объекта был выбран желтый круг. Описание алгоритма по обнаружению круга состоит из получения изображения с видеокамеры, преобразования цветового пространства, цветового порога, выделения контура, нахождения центроида. Схема работы алгоритма представлена на Рис.8.

**Экспериментальные данные.** При произвольном перемещении приводов данные записывались в csv-файл для дальнейшей обработки. Результат локализации центра каретки по камере и ToF-датчикам приведен на Рис.9.

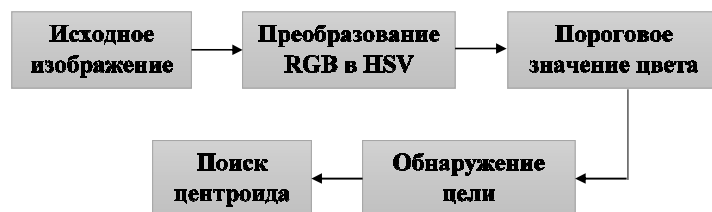


Рис.8 – Алгоритм распознавания

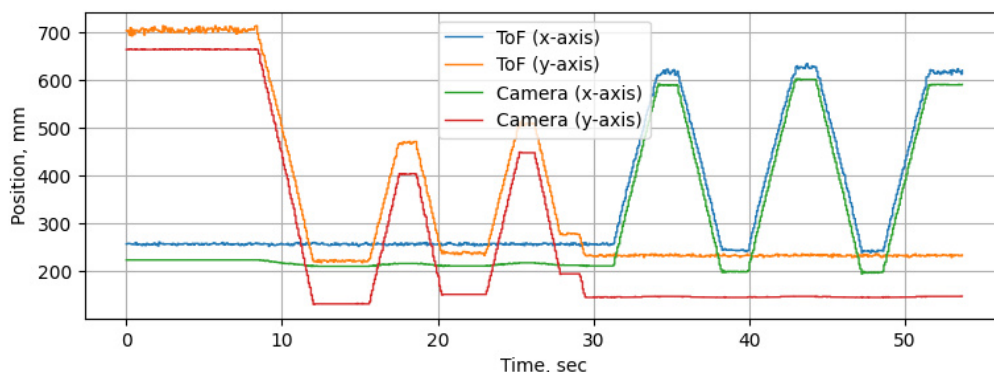


Рис.9 – Результаты локализации

Графики ошибки локализации по двум осям относительно референса показаний камеры приведены на Рис.10.

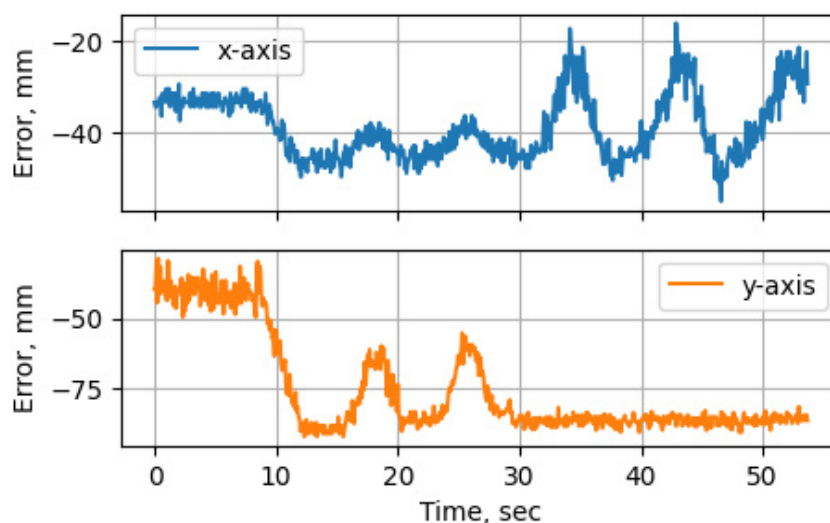


Рис.10 – Ошибки локализации

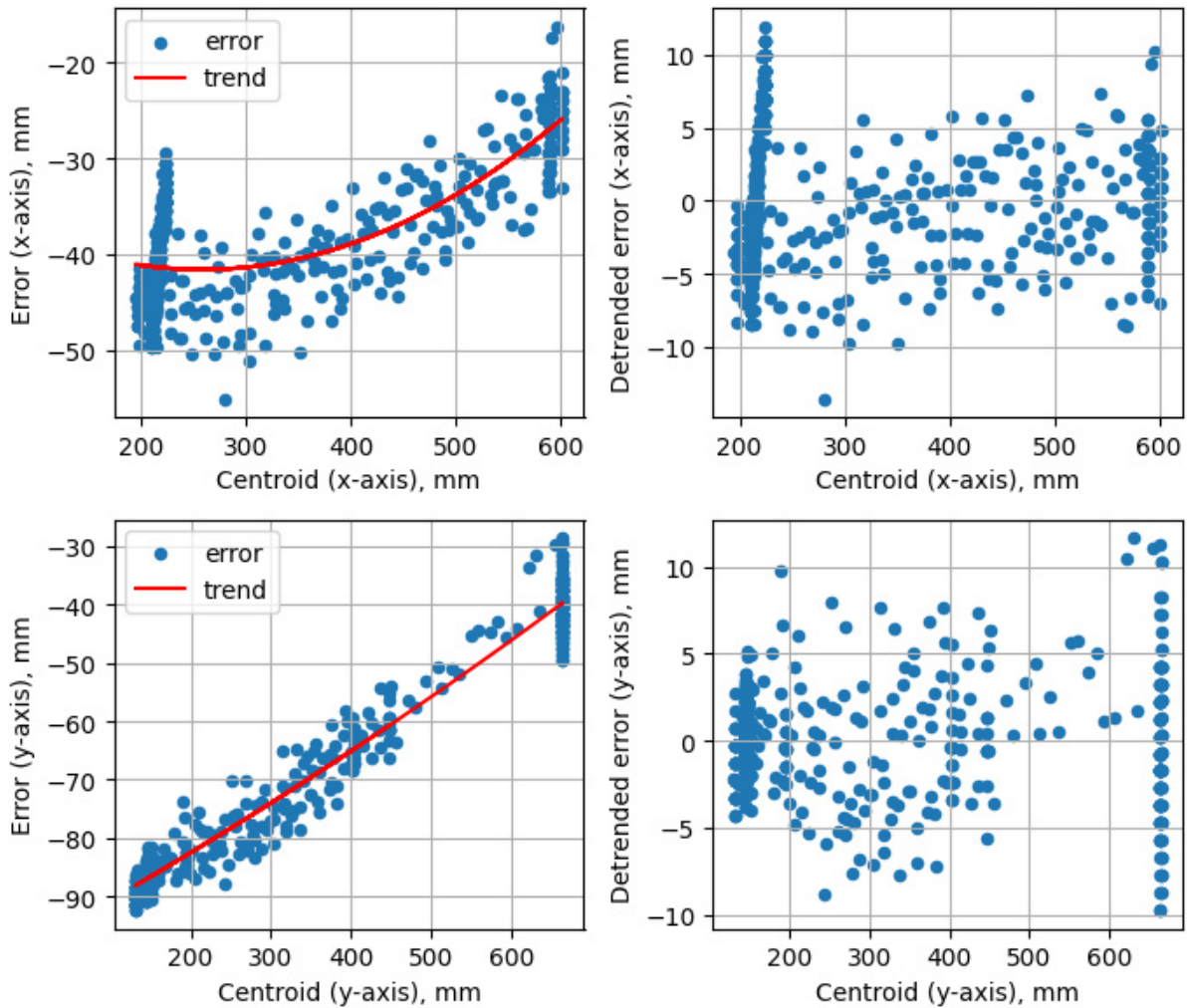


Рис.11 – Декомпозиция ошибки локализации

Большой интерес представляет собой зависимость ошибки от реального положения, т.к. погрешности времяпролетных датчиков должны быть нелинейными. Предполагается определить нелинейный тренд как полиномиальную функцию при помощи метода наименьших квадратов для разделения ошибки на две составляющие: тренд и шум (Рис.11) как

$$err(position) = trend(position) + noise.$$

Полиномы МНК определяющие тренды:

$$trend_x(x) = 0,0001335 \times x^2 - 0,06905 \times x - 32,69,$$

$$trend_y(y) = 0,0001335 \times y^2 - 0,06905 \times y - 32,69.$$

Полученная составляющая ошибки в виде шума представляет собой белый центрированный шум, что видно по гистограммам на Рис.12.

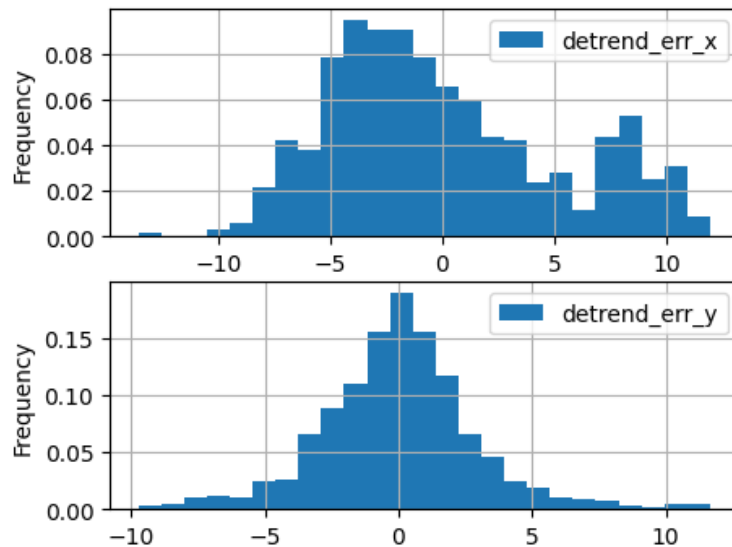


Рис.12 – Гистограммы шумов

Ковариационная матрица шумов измерений:

$$\text{cov}(\text{noise}_x, \text{noise}_y) = \begin{matrix} & \text{noise}_x & \text{noise}_y \\ \text{noise}_x & 24,354673 & 0,748782 \\ \text{noise}_y & 0,748782 & 8,885699 \end{matrix}$$

Параметры шумов позволяют использовать дискретный фильтр Калмана с последующей полиномиальной коррекцией измерений. Результат фильтрации при нулевых начальных состояниях и ковариациях шумов приведен на Рис.13.

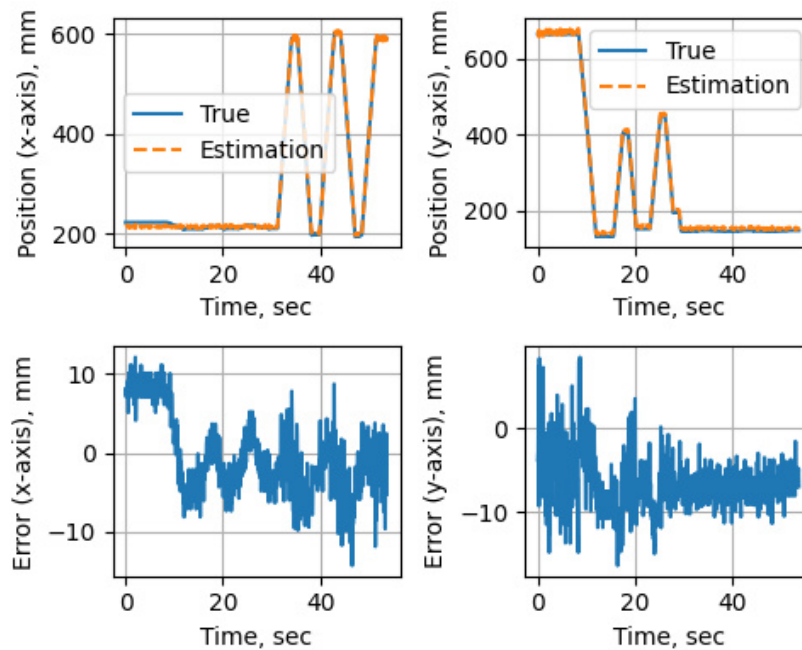


Рис.13 – Результаты фильтрации

Полученные результаты показывают хорошую сходимость фильтра и демонстрируют удовлетворительную точность локализации.

### **Заключение.**

Предложенный метод коррекции пролётных датчиков на основе визуального референса показал свою эффективность в задаче локализации каретки с двумя степенями свободы. Декомпозиция ошибки на трендовую и шумовую составляющие и их последующая коррекция с помощью полинома, определённого методом наименьших квадратов, и дискретного фильтра Калмана обеспечили высокую точность. Результаты проведённых экспериментов подтверждают эффективность предложенного метода и его возможности для использования в системах позиционирования с высокими требованиями к точности.

### **Библиографический список**

1. ToF-Systems / [Электронный ресурс] // [www.faster-than-light.net](http://www.faster-than-light.net) : [сайт]. — URL: [https://faster-than-light.net/TOFSystem\\_C1](https://faster-than-light.net/TOFSystem_C1) (дата обращения: 20.08.2024).
2. Dept. of Computing Fundamentals, FPT University, Hanoi, Vietnam., Pham G. N., Nguyen B. A. LiDAR/ToF Sensor System Based Various Applications: A Review // IJETAE. 2021. Т. 11. № 9. С. 33–37.
3. Illade-Quinteiro J. и др. Distance Measurement Error in Time-of-Flight Sensors Due to Shot Noise // Sensors. 2015. Т. 15. № 3. С. 4624–4642.
4. Adafruit VL53L0X Time of Flight Distance Sensor / [Электронный ресурс] // [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com) : [сайт]. — URL: <https://www.adafruit.com/product/3317> (дата обращения: 20.08.2024).
5. Baba A.I. Calibrating Time of Flight in Two Way Ranging / A.I. Baba // 2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Beijing, TBD, China: IEEE, 2011. С. 393–397.
6. Srinivas S. Extended Kalman Filter Design for Tracking Time-of-Flight and Clock Offsets in a Two-Way Ranging System / S. Srinivas, A. Herschfelt, D.W. Bliss // Signals. 2023. Т. 4. № 2. С. 439–456.
7. 1. Feigl T. Recurrent Neural Networks on Drifting Time-of-Flight Measurements/ T. Feigl и др. // 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Nantes, France: IEEE, 2018. С. 206–212.
8. Sunol F. High-Precision Time-of-Flight Determination Algorithm for Ultrasonic Flow Measurement / F. Sunol, D.A. Ochoa, J.E. Garcia // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2019. Т. 68. № 8. С. 2724–2732.
9. Corke P.I. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB / P.I. Corke // Berlin Heidelberg: Springer, 2013. Вып. Corr. 2. print. 570 с.

10. Кабанов А.А. Обнаружение, распознавание и локализация объекта в водной среде с заданными отличительными признаками при помощи системы технического стереозрения / А.А. Кабанов [и др.] // Управление и высокие технологии – 2023. – №2(62). – С. 59–73.
11. Ляшко А.Д. Метод наведения на цель подводного роботизированного комплекса с помощью видеосистем / А.Д. Ляшко [и др.] // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2024. – №1 (25). – С. 70 – 79.

<sup>1</sup>*Ляшко Александр Дмитриевич, ассистент, lyasko.sasha@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Дементьев Кирилл Валерьевич, ассистент, mash.saigon.89@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Liashko Aleksandr Dmitrievich, assistant, lyasko.sasha@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Dementiev Kirill Valerievich, assistant, mash.saigon.89@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

## РЫЧАЖНЫЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДВУМЯ РЕГУЛИРУЕМЫМИ СОПЛАМИ

Васютенко А.П.<sup>1</sup>, Балакина Н.А.<sup>2</sup>

## LEVER PNEUMATIC TRANSDUCER WITH TWO ADJUSTABLE NOZZLES

Vasyutenko A.P.<sup>1</sup>, Balakina N.A.<sup>2</sup>

**Аннотация.** Дана общая характеристика, указана область применения и описан принцип действия пневматических преобразователей для контроля геометрических параметров деталей в машино- приборостроении. Приведена схема и описание принципа работы пневматической контактной головки с измерительным рычагом и двумя регулируемыми соплами, сформулирована цель работы – повышение чувствительности и диапазона измерения пневматических преобразователей. Приведен вывод уравнения статической характеристики, описывающей зависимость измерительного давления воздуха от зазора между измерительным соплом и заслонкой.

**Annotation.** The general characteristic is given, the field of application is specified and the principle of operation of pneumatic transducers for control of geometrical parameters of parts in machine and instrument engineering is described. The scheme and description of the principle of operation of pneumatic contact head with a measuring arm and two adjustable nozzles are given, the aim of the work is formulated - to increase the sensitivity and measuring range of pneumatic transducers. The conclusion of the equation of the static characteristic describing the dependence of the measuring air pressure on the gap between the measuring nozzle and the flap is given.

**Ключевые слова.** Пневматика, преобразователь, чувствительность, измерение, диапазон измерения, моделирование.

**Keywords.** Pneumatics, transducer, sensitivity, measurement, measurement range, modeling.

### Введение.

Пневматические измерительные приборы обладают достаточно высокой точностью измерения, позволяют производить дистанционные измерения деталей; малогабаритная пневматическая измерительная оснастка позволяет выполнять измерения в относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции

измерительных устройств для контроля практически любых линейных параметров деталей и изделий [2,3,9].

Пневматические приборы и датчики можно легко комбинировать, образуя из них многопараметрические системы контроля геометрических параметров деталей малого размера. Положительным качеством является нечувствительность преобразователей к вибрациям и смазочно-охлаждающей жидкости, что обеспечивает их широкое применение в приборах активного контроля, осуществляющих измерение размеров деталей в процессе их обработки на кругло- и плоскошлифовальных станках [1,4,8,10-12].

В пневматических приборах для линейных измерений используется зависимость давления воздуха  $h$  в измерительной ветви от площади  $F_2$  проходного сечения канала истечения  $h = f(F_2)$ . Принцип действия прибора, схема которого приведена на Рис.1,а, следующий. Сжатый воздух под постоянным рабочим давлением  $H$  через входное сопло 1 поступает в измерительную камеру 3 и далее через кольцевой зазор, образованный торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали, истекает в атмосферу. В зависимости от зазора  $Z$  в камере 3 устанавливается определенное измерительное давление  $h$ , которое регистрируется с помощью показывающего прибора – манометра 4 или другого устройства (сильфонного, мембранного, комбинированного пневмо-индуктивного).

На Рис.1,б обозначены  $\Delta Z$  – прямолинейный участок статической характеристики преобразователя;  $\Delta_z$  – нелинейности статической характеристики на краях прямолинейного участка.

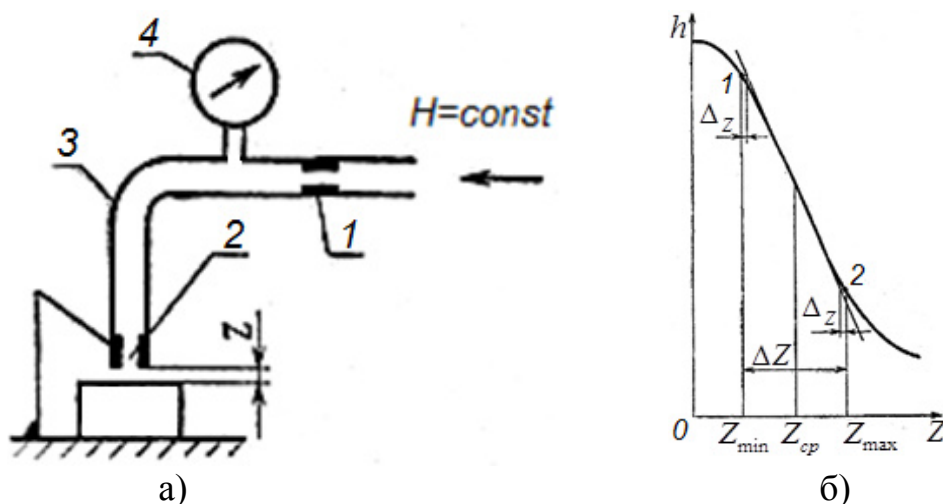


Рис.1 – Измерительная схема пневматического прибора:  
а) схема прибора; б) статистическая характеристика

**Целью работы** является повышение чувствительности и точности пневматических преобразователей на основе совершенствования их схемы и принципа действия.

### Описание схемы.

Принципиальная схема преобразователя с передаточным рычагом 3 и двумя соплами 1, 2 с регулируемыми проходными сечениями представлена на Рис.2. Входное 2 и измерительное 1 сопла находятся на расстоянии  $L = R - r$  друг от друга. По этой причине перемещения заслонок 4, 5 и соответственно изменение зазоров  $Z$  и  $Z_1$  перед измерительным соплом 1 и входным соплом 2 не равны и определяются из соотношения (1).

$$Z_1 = \frac{Z}{i} = \frac{rZ}{R}, \quad (1)$$

где  $i = \frac{R}{r}$  – передаточное отношение измерительного рычага 3.

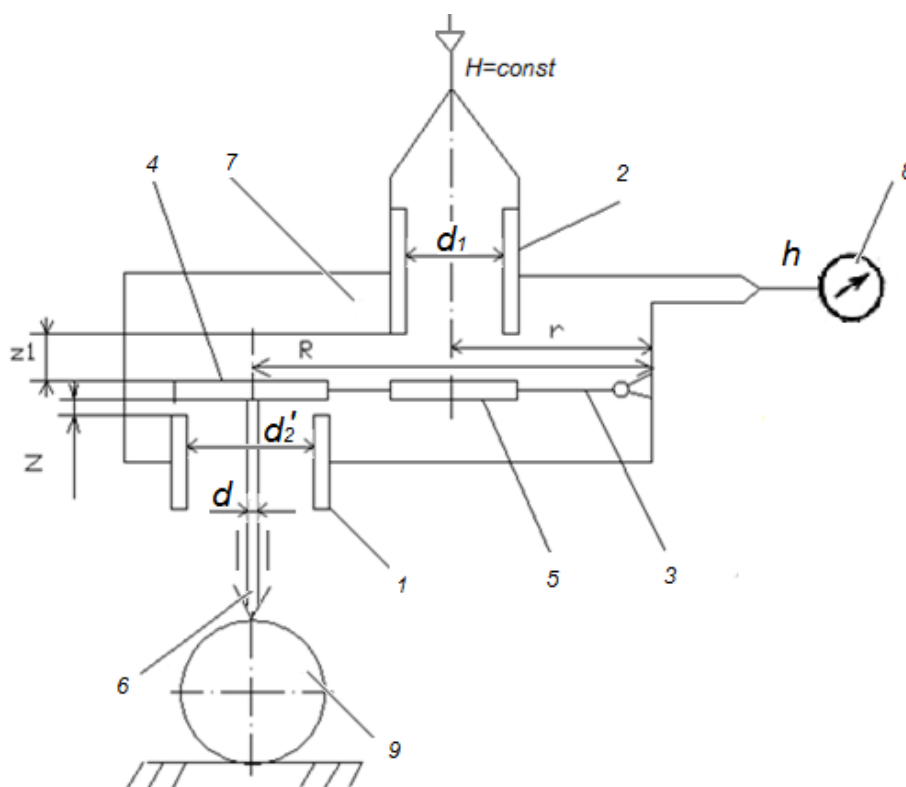


Рис.2 – Принципиальная схема рычажного пневматического преобразователя с двумя регулируемыми соплами:  
1 – измерительное сопло; 2 – входное сопло; 3 – рычаг; 4,5 – заслонки; 6 – измерительный шток; 7 – измерительная камера; 8 – показывающий прибор; 9 – контролируемая деталь

### Уравнения статической характеристики.

При расчете и проектировании систем пневмоавтоматики для нахождения массового расхода воздуха через дроссели, при турбулентном режиме течения часто применяют известные из газовой динамики формулы [5-7]. А именно, для докритического режима истечения, когда  $p_2 / p_1 \geq 0,5$ ,

$$G = \mu F p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_2} \left[ \frac{p_2}{p_1} \left( 1 - \frac{p_2}{p_1} \right) \right]},$$

где  $p_1$ ,  $p_2$  – абсолютные давления воздуха до и после дросселя;  $\mu$  – коэффициент истечения воздуха;  $F$  – площадь проходного сечения дросселя;  $R$  – газовая постоянная;  $T_2$  – абсолютная температура воздуха после дросселя.

А для надкритического режима истечения, при  $p_2 / p_1 \leq 0,5$

$$G = \mu F p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_2}}.$$

При малых перепадах давлений на дросселе, когда есть возможность пренебречь изменением плотности воздуха, расчет расхода воздуха при докритическом режиме проводится по формуле [9]:

$$G = \mu F \sqrt{2\rho} \sqrt{p_1 - p_2}.$$

Так как согласно Рис.2 воздух последовательно проходит два сопла (входное 2 и измерительное 1), выразим значения расходов для каждого из сопел следующим образом:

для входного сопла

$$G_1 = \mu_1 F_1 \sqrt{2\rho_1} \sqrt{p_1 - p_2}, \quad (2)$$

для измерительного сопла

$$G_2 = \mu_2 F_2 \sqrt{2\rho_2} \sqrt{p_2 - p_a}, \quad (3)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление воздуха.

После перехода от абсолютных давлений к избыточным выражения (2), (3) примут следующий вид:

$$G_1 = \mu_1 F_1 \sqrt{2\rho_1} \sqrt{H - h}, \quad (4)$$

$$G_2 = \mu_2 F_2 \sqrt{2\rho_2} \sqrt{h}, \quad (5)$$

где  $H$  – избыточное рабочее давление воздуха (перед входным соплом);  $h$  – избыточное давление воздуха (за входным соплом) в измерительной ветви;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность воздуха, истекающего из входного и измерительного сопел.

В установившемся режиме течения воздуха расходы через входное и измерительные сопла равны:

$$G_1 = G_2. \quad (6)$$

После подстановки  $G_1$  и  $G_2$  согласно (4), (5) в формулу (6) и преобразования получим:

$$h = \frac{H}{1 + \left( \frac{\mu_2 F_2}{\mu_1 F_1} \right)^2} = \frac{H}{1 + \left( \frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^2 \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2}. \quad (7)$$

Коэффициенты расхода  $\mu_1$  и  $\mu_2$  являются переменными величинами, которые зависят от многочисленных, неподдающихся точному определению, факторов: давления до и после сопла, геометрической формы сопла, шероховатости поверхности канала, скорости потока и т. д. По этой причине, для упрощения формулы коэффициенты расхода входного и измерительного сопел считают равными  $\frac{\mu_1}{\mu_2} = 1$ . Выражение (7)

примет вид:

$$h = \frac{H}{1 + \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2}. \quad (8)$$

В исследуемом пневматическом преобразователе переменными являются площади проходных сечений входного и измерительного сопел.

Согласно схемы (Рис.2) измерительного преобразователя при изменении размера контролируемой детали 9 и перемещении штока 6 происходит изменение положения заслонок 4 и 5 у измерительного 1 и входного 2 сопел, а, следовательно, и зазоров  $Z$  и  $Z_1$ . Максимальная величина зазора  $Z_{\max}$  между соплом и заслонкой определяется из условия равенства площадей истечения воздуха через кольцевой зазор между соплом и заслонкой и поперечного сечения отверстия  $i$ -го сопла:

$$\pi d_i Z_i = \frac{\pi d_i^2}{4},$$

откуда

$$Z_{\max} = \frac{d_i}{4},$$

где  $d_i$  – диаметр отверстия сопла.

Если  $Z_i > Z_{i\max}$ , то изменение расхода воздуха через сопло не происходит. Так как согласно принципа работы преобразователя диаметр входного сопла  $d_1$  меньше диаметра измерительного сопла  $d_2$  максимальную величину зазора определяем исходя из величины диаметра отверстия входного сопла.

$$Z_{1\max} = \frac{d_1}{4}. \quad (9)$$

При использовании двух регулируемых сопел типа сопло-заслонка и выполнении условия (Рис.2)

$$Z_{\Sigma} = Z + Z_1.$$

Согласно формулы (9) зазор между измерительным соплом 1 и заслонкой 4  $Z = 0$ , если зазор  $Z_1$  между заслонкой 5 и входным соплом 2 будет равен  $Z_1 = d_1 / 4$ . Текущее значение зазора  $Z_1$  с учетом передаточного отношения  $i$  рычага 3 равно:

$$Z_1 = f(Z) = Z_{1\max} - \frac{Z}{i} = \frac{d_1}{4} - \frac{Z}{i}.$$

Тогда площадь кольцевого зазора между входным соплом 2 и заслонкой 5 равна:

$$F_1 = \pi d_1 Z_1 = \pi d_1 \left( \frac{d_1}{4} - \frac{Z}{i} \right), \quad (10)$$

а площадь кольцевого зазора  $F_2$  между измерительным соплом и заслонкой

$$F_2 = \pi d_2 Z. \quad (11)$$

Подставляя выражения (10) и (11) в формулу (8), получаем уравнение статической характеристики для схемы рычажного преобразователя с двумя регулируемыми соплами:

$$h = \frac{H}{1 + \left[ \frac{\pi d_2 Z}{\pi d_1 \left( \frac{d_1}{4} - \frac{Z}{i} \right)} \right]^2}.$$

После преобразования получим:

$$h = \frac{H}{1 + \left[ \frac{d_2 Z}{\left( \frac{d_1^2}{4} - \frac{d_1 Z}{i} \right)} \right]^2}. \quad (12)$$

Для сопла цилиндрической формы площадь поперечного сечения измерительного сопла  $F_2$  при  $d_2 = 2$  мм равна:

$$F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Так как в отверстии измерительного сопла находится измерительный шток диаметром  $d$ , то диаметр отверстия  $d'_2$  (Рис.2) должен быть рассчитан с учетом равенства проходных сечений сопла со штоком  $F'_2$  и обычного измерительного сопла

$$F'_2 = F_2 = \frac{\pi (d'_2)^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}, \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр штока 6.

Из выражения (13) определяем  $d'_2$

$$d'_2 = \sqrt{\frac{4 \left( F_2 + \frac{\pi d^2}{4} \right)}{\pi}}.$$

При  $F_2 = 3,14 \text{ мм}^2$ , стандартном значении диаметра измерительного сопла  $d_2 = 2$  мм и принятом диаметре штока  $d = 1$  мм получаем

$$d'_2 = \sqrt{4 \left( \frac{3,14 + \frac{3,14 \cdot 1^2}{4}}{3,14} \right)} = \sqrt{4 \left( 1 + \frac{1}{4} \right)} = \sqrt{5} \text{ мм.}$$

Подставляя  $d'_2 = \sqrt{5}$  в выражение (12), получим после преобразования:

$$h = \frac{H}{1 + \left[ \frac{4\sqrt{5}Z}{\left( d_1^2 - 4d_1 \frac{Z}{i} \right)} \right]^2} = \frac{H}{1 + \frac{80Z^2}{\left( d_1^2 - 4d_1 \frac{Z}{i} \right)^2}}. \quad (14)$$

Полученное выражение (14) описывает статическую характеристику  $h = f(Z)$  рычажного пневматического преобразователя с регулируемой площадью кольцевых зазоров между соплом и заслонкой входного и измерительного сопел.

### **Заключение.**

1. Приведены общая характеристика, область применения и принцип действия пневматических преобразователей для контроля геометрических параметров деталей в машино- приборостроении.

2. Рассмотрена схема рычажного пневматического измерительного преобразователя с двумя регулируемыми соплами (входным и измерительным), площади кольцевых зазоров истечения воздуха которых зависят от размера контролируемых деталей.

3. На основе формул газовой динамики для массового расхода воздуха через пневмосопротивления турбулентного типа получено выражение, описывающее статическую характеристику исследуемого преобразователя.

### **Библиографический список**

1. Ахмеджанов Р.А. Физические основы получения информации: учебное пособие / Р.А. Ахмеджанов, А.И. Чередов – Электрон. текстовые данные. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 212 с.
2. Волосов С.С. Приборы автоматического контроля в машиностроении/ С.С. Волосов, Е.И. Педь. – М.: Изд-во Машиностроение, 1970. – 310 с.
3. Высоцкий А.В. Конструирование и наладка пневматических устройств для линейных измерений/ А.В. Высоцкий, А.П. Курочкин –

- Машиностроение, 1972. – 156 с.
4. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие / А.Е. Гольдштейн. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.
  5. Ибрагимов И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзана, М.В. Илясов – М.: Высшая школа, 1975. – 357 с.
  6. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении / А.Г. Иванов – М.: Машиностроение, 1964. – 524 с.
  7. Высоцкий А.В. Пневматические измерения линейных размеров / А.В. Высоцкий, А.П. Курочкин и др. – Маш.гиз, 1963. – 268 с.
  8. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В. П. Легаев – Владим. Гос. Ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009.–123 с.
  9. Педь Е.И. Активный контроль в машиностроении/ Е.И. Педь. – М.: Изд-во Машиностроение, 1991. – 359 с.
  10. Рабинович А.И. Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник / А.И. Рабинович – К.: Техника, 1970. – 396 с.
  11. Цидулко Ф.В. Точность пневматического контроля линейных размеров / Ф.В. Цидулко – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 156 с.
  12. Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингоф – М.: АПР, 2016. – 336 с.

<sup>1</sup>*Васютенко Александр Павлович, канд. техн. наук, доц., доцент, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

<sup>2</sup>*Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

*Vasyutenko Alexander Pavlovich, candidate of technical sciences, associate professor, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Balakina Natalia Anatolievna, senior lecturer, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал  
Выпуск №3(27) 2024 г.

16+

## Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(692)550077

<https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/3655-avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashinopriborostroenii>

e-mail: [appr.sevgu@yandex.ru](mailto:appr.sevgu@yandex.ru)

Отпечатано в издательстве СевГУ,

адрес типографии ФГАОУ ВО СевГУ:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино- приборостроении» обязательна.

## Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.  
Севастополь, 299053.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Филипович Олег Викторович

---

Подписано к печати 07.10.2024. Заказ 22/2024 . Дата выхода в свет: 05.11.2024. Тираж: 50 экз.  
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 12,09.

---

Севастополь, 2024