

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№1(25)
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
Копп В.Я., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Заместитель главного редактора
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Ответственный секретарь
Балакин А.И., к.т.н., доц.
(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., проф.
(г. Севастополь)
Жмудь В.А., д.т.н., проф.,
(г. Новосибирск)
Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Моисеев Д.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(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., Чалая Е.С. Колебания нежесткой заготовки при
токарной обработке 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Песчанский А.И. Стационарные характеристики многокомпонентной
системы с потерями и контролем качества обслуживания 13
Крамарь В.А., Троицкая А.А., Якунин Р.Д. Программный комплекс для
обмена данными между антропоморфным роботом SAR-401 и ведущим
устройством, основанном на принципе копирования 25
Заморёнов М.В., Шаталова Ю.Г. Моделирование процесса обработки
заявок к распределенной базе данных промышленного предприятия 35
Бохонский А.И., Варминская Н.И. Обоснование реверсионного
конструирования оптимального управления движением объектов 44
Карлусов В.Ю. Алгоритм вычисления двумерного преобразования Фурье
с использованием сплайна Эрмита 51
Мирзоян Н.Ю., Заморёнов М.В., Шаталова Ю.Г. Анализ влияния
профилактики вихретокового преобразователя на надежность
дефектоскопа 62

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Ляшко А.Д., Васильев Д.М., Крамарь В.А. Метод наведения на цель
подводного роботизированного комплекса с помощью видеосистем 70
Никишин В.В., Вожжов А.А. Разработка и моделирование системы
курсовой ориентации морской надводной многофункциональной
платформы 80
Поливцев В.П., Балакин А.И., Поливцев В.В. Исследование процесса
газообмена в легких при жидкостном дыхании с помощью аппарата с
замкнутым дыхательным контуром 89
Невар Г.В., Чаленков Н.И., Мирзоян Н.Ю. Медицинский стробоскоп 110

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

Kopp V.Ya., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Deputy Editor-in-Chief

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

Scientific Editor

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

Executive Secretary

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

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

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

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

Obzherin Yu.E., doctor of technical sciences, professor (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., Chalaya E.S.** Flexible workpiece vibrations during turning 4

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

- Peschansky A.I.** Stationary characteristics of a multi-server loss queuing system with regard to service quality control 13
- Kramar V.A., Troitskaya A.A., Yakunin R.D.** A software package for data exchange between an anthropomorphic SAR-401 robot and a master device based on the principle of copying 25
- Zamoryonov M.V., Shatalova J.G.** Modeling the processing process of applications for distributed database of an industrial enterprise 35
- Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I.** Justification of reversive designing of optimal object movement control 44
- Karlusov V.Yu.** An algorithm for calculating the two-dimensional Fourier transform using the Hermite spline 51
- Mirzoyan N.Y., Zamoryonov M.V., Shatalova Ju.G.** Analysis of the effect of an eddy current converter prevention on the reliability of the flaw detector 62

MEASURING INSTRUMENTS AND METHODS

- Liashko A.D., Vasiliev D.M., Kramar V.A.** Method of targeting an underwater robotic complexes using video systems 70
- Nikishin V.V., Vozhzhov A.A.** Development and simulation of a course orientation system for a marine surface multi-functional platform 80
- Polivtsev V.P., Balakin A.I., Polivtsev V.V.** Study of the process of gas exchange in the lungs during liquid breathing using a closed breathing circuit apparatus 89
- Nevar G.V., Chalenkov N.I., Mirzoyan N.Y.** Medical stroboscope 110

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.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.941

КОЛЕБАНИЯ НЕЖЕСТКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Бохонский А.И.¹, Чалая Е.С.²

Аннотация. Исследованы колебания закрепленной в центрах заготовки конечной жесткости при автоматической токарной обработке. Вынужденные колебания обусловлены движением с постоянной скоростью радиальной составляющей силы резания вдоль заготовки. В случае использования дополнительной опоры с увеличением жесткости системы (задача статически неопределимая) существенно изменяется характер колебаний и свободными колебаниями можно пренебречь. Приведение заготовки с распределенной массой к системе с одной степенью свободы практически не влияет на первую (основную) форму колебаний.

Ключевые слова. Токарная обработка, нежесткая заготовка, свободные и вынужденные колебания, использование дополнительной опоры (люнета).

Введение

Задачи о колебаниях балки при движении груза с постоянной скоростью приведены, например, в [1]. Действие груза на балку представлено в виде ряда Фурье с удержанием только одного члена ряда. Исследованы свободные и вынужденные колебания, найдена частота вынужденных колебаний, показан рост амплитуд колебаний с увеличением скорости движения груза. В этой работе обращено внимание на необходимость совершенствования динамической модели.

В [2] решена задача определения изгибных колебаний шарнирно закрепленной балки в зависимости от скорости движения силы. Сила в произвольный момент времени представлена с использованием дельта функции с ее разложением по формам собственных колебаний. Для принятых допущений получено решение уравнения колебаний и отмечено, что «никаких критических скоростей для движущейся силы не существует».

Расчету балок постоянной жесткости на подвижную нагрузку посвящен раздел учебника [3], в котором содержится утверждение: «С течением времени перемещения балки неограниченно растут, т.е. имеет место резонанс».

Даже для балок постоянного поперечного сечения без учета сопротивления с учетом только одной формы колебаний возникают

известные аналитические трудности при получении полезного практического результата для численной оценки влияния исходных данных на динамику стержня конечной жесткости.

В работе [5] предложено не только компенсировать перемещения нежесткой заготовки по направлению силы резания, но и управлять ее непрерывным деформированием при автоматической токарной обработке.

Новому классу задач оптимального управления деформированием нежестких заготовок посвящена монография [5]. Предложены специальные приспособления и механические исполнительные органы САУ деформациями деталей конечной жесткости, включающие управление по медленному и быстрому (колебаниями) движению – управление квазистатическим положением равновесия заготовок при медленном движении силы резания и в сочетании с активным гашением колебаний, обусловленных медленным движением источника сложных колебаний (очагом резания).

Определенным этапом и обобщением теоретических и экспериментальных исследований повышения точности автоматической токарной обработки являлась монография [6], в которой уделено внимание механизму образования погрешности в связи с упругими квазистатическими и динамическими деформациями обрабатываемых нежестких заготовок. Экспериментальные исследования компенсации упругих перемещений при обработке валов подтвердили с достаточной точностью результаты моделирования.

Цель исследований – анализ колебаний заготовки, обусловленных движением силы резания. Рассматриваются упрощенные динамические модели колебаний нежесткой заготовки при ее закреплении в центрах.

Динамика нежесткой заготовки при постоянной по модулю медленно движущейся радиальной составляющей силы резания.

Колебания нежесткой заготовки описываются дифференциальным уравнением (Рис.1):

$$m_0 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} = P_y (x - vt);$$

или

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} = \frac{P_y}{m_0} \delta(x - vt), \quad (1)$$

где m_0 – распределенная масса заготовки (кг/м); EI – жесткость при изгибе (E – модуль упругости первого рода; $I = \frac{\pi d^4}{64}$ – осевой момент инерции поперечного сечения заготовки диаметром d); P_y – радиальная составляющая силы резания.

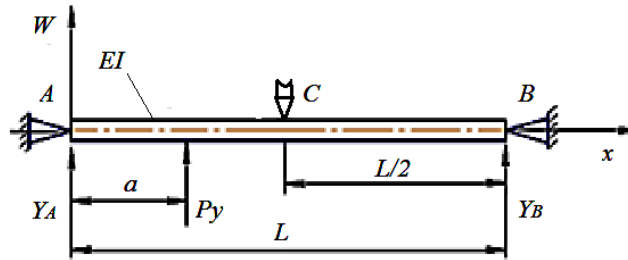


Рис.1 – Схема токарной обработки нежесткой заготовки (дополнительная опора в точке C)

Раскладывая функцию $\delta(x - vt)$ по формам свободных колебаний заготовки, закрепленной в центрах, получим:

$$\delta(x - vt) = \sum_n \frac{2}{L} \sin \frac{\pi n vt}{L} \sin \frac{\pi nx}{L},$$

где L – длина заготовки, v – скорость движения режущего инструмента вдоль заготовки.

Решение уравнения (1) находится в виде:

$$W(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \cdot \sin \frac{\pi nx}{L}. \quad (2)$$

При $n = 1$ (учет только первой формы колебаний) из (2) следует:

$$W_1(x, t) = y_1(t) \cdot \sin \frac{\pi x}{L}. \quad (3)$$

После подстановки (3) в (1) и преобразований, получаем уравнение:

$$\ddot{y}_n + a^2 \left(\frac{\pi n}{L} \right)^4 \cdot y_n = \frac{2P_y}{m_0 L} \cdot \sin \frac{\pi n vt}{L}. \quad (4)$$

С целью упрощения преобразований (в Maple) далее принято:

$$\alpha = a \left(\frac{\pi n}{L} \right)^2; A = \frac{2P_y}{mL \left(a^2 \left(\frac{\pi n}{L} \right)^4 - \left(\frac{\pi n v}{L} \right)^2 \right)}; B = \frac{\pi n v}{L}. \quad (5)$$

С учетом обозначений (5) общее решение уравнения (4):

$$y_n(t) = c_1 \cos(\alpha t) + c_2 \sin(\alpha t) + A \sin Bt. \quad (6)$$

С учетом условий $W_n(0) = 0$ и $\frac{dW_n}{dt}(0) = 0$,

из (6) следуют значения произвольных постоянных:

$$c_1 = 0; c_2 = -\frac{AB}{\alpha}.$$

Пример. Исходные данные:

$$n = 1; d = 0,02 \text{ м}; L = 0,5 \text{ м}; E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}; I = \frac{\pi d^4}{64}; \nu = 0,02 \text{ м/с};$$

$$P_y = 300 \text{ Н}.$$

Перемещение описывается зависимостью:

$$W(t) = \frac{2P_y}{m_0 L} \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi\nu}{L}t\right) - \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi n\nu}{L}\right)^2 at}{a^2\left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 - \left(\frac{n\pi\nu}{L}\right)^2} \right).$$

Для принятых исходных данных график $W_1(t)$ изображен на (Рис.2).

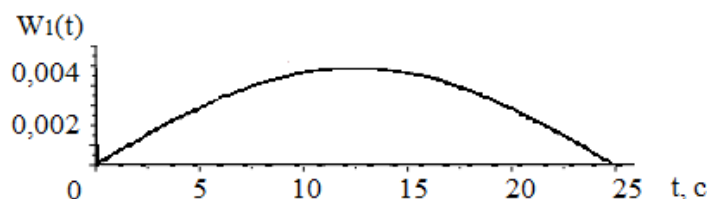


Рис.2 – График $W_1(t)$

Приближенное решение с заменой распределенной массы сосредоточенной (посередине пролета заготовки).

В этом случае решение обыкновенного уравнения

$$\ddot{W} + \omega^2 W = \omega^2 \delta_{l1} P_y \sin \theta t$$

имеет вид:

$$W(t) = \frac{P_y \delta_{11}}{1 - \beta^2} (\sin \theta t - \beta \sin \omega t),$$

где $\delta_{11} = \frac{L^3}{48EI}$; $\omega^2 = \frac{1}{M\delta_{11}}$; $M = \frac{m_0 L}{2}$; $\beta = \frac{\theta}{\omega}$; $\theta = \frac{\pi r}{L}$.

Для прежних исходных данных получим:

$$W(t) = 0,00047 \sin(0,1256t) - 5,85 \cdot 10^{-8} \sin(1016,8t).$$

Интересно, что частоты собственных колебаний близки.

График $W(t)$ изображен на (Рис.3) и (Рис.4).

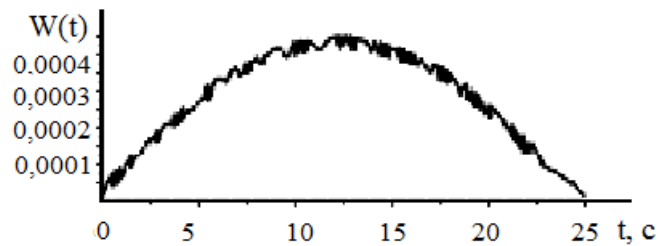


Рис.3 – График вынужденных и собственных колебаний $W(t)$

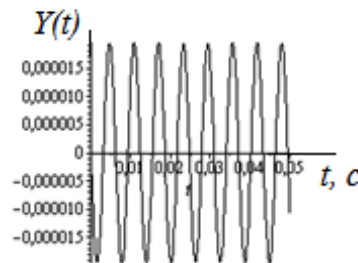


Рис.4 – График собственных колебаний $y(t)$

Анализ квазистатического деформирования заготовки при постановке дополнительной опоры

Роликовая опора ставится посередине обрабатываемой, с закреплением в центрах, заготовки. С точки зрения механики деформируемого твердого тела, задача является один раз статически неопределимой. Для раскрытия статической неопределимости используется метод начальных параметров. В качестве неизвестных приняты: θ_0 – угол поворота на левой опоре; y_A, y_C – реакции опор. Обозначенные неизвестные находятся из системы трех алгебраических

уравнений. Условия равновесия и равенства вертикальных перемещений

опор C и B : $\sum_{k=1}^n F_{ky} = 0$; $W_C = 0$; $W_B = 0$;

$$\begin{aligned} -Y_A \cdot L + P_y(L - a) - \frac{Y_c \cdot L}{2} &= 0; \\ \theta_0 \cdot \frac{L}{2} + \frac{1}{EI} \left(\frac{Y_A \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3}{6} + \frac{P_y \cdot \left(\frac{L}{2} - a\right)^3}{6} \right) &= 0; \\ \theta_0 \cdot L + \frac{1}{EI} \left(\frac{Y_A \cdot L^3}{6} + \frac{P_y \cdot (L - a)^3}{6} - \frac{Y_c \cdot \left(L - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из системы уравнений (7) следует:

$$\theta_0 = \frac{3}{256} \frac{P_y L^3}{EI}; \quad Y_A = -\frac{13}{32} P_y; \quad Y_c = \frac{11}{16} P_y.$$

Максимальное перемещение заготовки по направлению радиальной составляющей силы резания (при $a = \frac{L}{4}$) от изгиба равно:

$$W(a) = \theta_0 \cdot a - Y_A \frac{a^3}{6EI} = \frac{49}{73728} \frac{P_y L^3}{EI} = -0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Для заготовки без средней дополнительной опоры при $a = \frac{L}{2}$ максимальное перемещение

$$W(a) = -\frac{P_y L^3}{48EI} = -0,473 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

При использовании роликовой дополнительной опоры (стационарного люнета) квазистатическое перемещение сечения заготовки уменьшается в 31,4 раз.

Основная форма (мода) колебаний в случае применения дополнительной опоры, обусловленная движением режущего инструмента вдоль заготовки, изображена на (Рис.5).

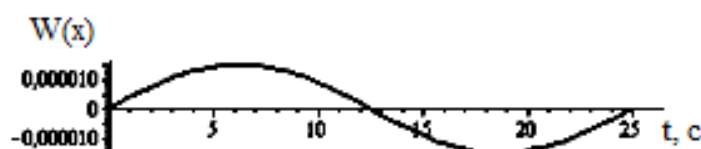


Рис.5 – Форма колебаний заготовки с учетом дополнительной опоры

Амплитуды собственных колебаний малы и поэтому практически не влияют на квазистатическое деформирование заготовки.

Заключение.

На практике при обоснованном расчете можно обойтись без специальной компенсации упругих перемещений или, как показано в ряде работ, непрерывно управляемого деформирования. Достаточно использовать стационарную опору, которая существенно меняет динамические свойства обрабатываемой заготовки. Приближенная замена распределенной массы заготовки сосредоточенной принципиально не влияет на основное динамическое свойство заготовки – преобладание первой формы колебаний. Постановка опоры на порядки снижает влияние колебаний заготовки на технологический процесс и позволяет не учитывать высокочастотные колебания. Такая опора может играть роль динамического гасителя колебаний.

Библиографический список

1. Бернштейн С.А. Основы динамики сооружений / С.А. Бернштейн – Росстройиздат. М: Москва. Ленинград, 1938. – 160с.
2. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высшая школа, 1973. – 456 с.
3. Киселев В.А. Строительная механика. Спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений / В.А. Киселев – М: Стройиздат, 1980. – 616с.
4. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированием заготовок при токарной обработке / А.И. Бохонский, Л.А. Шмидт. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – 109с.
5. Бохонский А.И. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке. Монография / А.И. Бохонский, А.Н. Вохмянин. –

Севастополь. Изд-во СевГТУ, 1990. – 240 с.

6. Бохонский А.И. О повышении точности автоматической токарной обработки нежестких деталей / А.И. Бохонский // Приборостроение: сб. науч. тр., 1983 – № 34. – С. 53-57.
7. Бохонский А.И. Совершенствование модели управления деформированием нежесткой заготовки при токарной обработке / А.И. Бохонский, Е.С. Чалая // Транспортное, горное и строительное машиностроение, наука и производство, 2023. – № 20 – С. 53-57.

Bibliograficheskij spisok

1. Bernshtejn S.A. Osnovy dinamiki sooruzhenij / S.A. Bernshtejn – Rosstrojizdat. M: Moskva. Leningrad, 1938. – 160s.
2. Svetlickij V.A. Sbornik zadach po teorii kolebanij / V.A. Svetlickij, I.V. Stacenko. – M.: Vysshaya shkola, 1973. – 456 s.
3. Kiselev V.A. Stroitel'naya mekhanika. Spec. kurs. Dinamika i ustojchivost' sooruzhenij / V.A. Kiselev – M: Strojizdat, 1980. – 616s.
4. Bohonskij A.I. Kompensaciya peremeshchenij i upravlenie deformirovaniem zagotovok pri tokarnoj obrabotke / A.I. Bohonskij, L.A. SHmidt. – Novokuzneck: NIC MS, 2018. – 109s.
5. Bohonskij A.I. Upravlenie deformirovaniem nezhestkih detalej pri tokarnoj obrabotke. Monografiya / A.I. Bohonskij, A.N. Vohmyanin. – Sevastopol'. Izd-vo SevGTU, 1990. – 240 s.
6. Bohonskij A.I. O povyshenii tochnosti avtomaticheskoy tokarnoj obrabotki nezhestkih detalej / A.I. Bohonskij // Priborostroenie: sb. nauch. tr., 1983 – № 34. – S. 53-57.
7. Bohonskij A.I. Sovershenstvovanie modeli upravleniya deformirovaniem nezhestkoj zagotovki pri tokarnoj obrabotke / A.I. Bohonskij, E.S. CHalaya // Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie, nauka i proizvodstvo, 2023. – № 20 – S. 53-57.

¹*Бохонский Александр Иванович, д.т.н., профессор, профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Чалая Елена Сергеевна, преподаватель, elenasergeevnae@yandex.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова*

FLEXIBLE WORKPIECE VIBRATIONS DURING TURNING

A.I. Bokhonsky, E.S. Chalaya

It has been studied the stress fluctuations in the centers of products of finite rigidity during automatic turning. Forced vibrations are caused by the movement of the radial cutting force at a constant speed along the workpiece. In the case of using additional supports with the appearance of system rigidity (a statically indeterminate problem) the nature of vibrations changings and free vibrations can be neglected. Bringing objects with distributed mass to a system with one degree of freedom hasn't virtually effect on the first (main) mode of vibration.

Key words: turning, non-rigid workpiece, free and forced vibrations, using of additional support (the rest).

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

Chalaya Elena Sergeevna, lecturer, elenasergeevnae@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

УДК 519.873

СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОТЕРЯМИ И
КОНТРОЛЕМ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Песчанский А.И.

Аннотация. Объектом исследования является неоднородная многокомпонентная система массового обслуживания с потерями, простейшим входящим потоком и временами обслуживания заявок общего вида. Предполагается, что после завершения обслуживания заявки каждым прибором осуществляется контроль качества его проведения. В случае неудовлетворительного качества заявка сразу направляется на повторное обслуживание, которое повторяется до тех пор, пока обслуживание не будет признано удовлетворительным. Построена математическая модель функционирования системы, найдены финальные вероятности состояний системы и среднее стационарное время пребывания системы в состоянии полной загрузки.

Ключевые слова. Многокомпонентная система, контроль качества обслуживания, финальные вероятности состояний, среднее стационарное время пребывания в состоянии полной загрузки

Введение. Многочисленные теоретические исследования систем массового обслуживания (СМО) вызваны их широким применением во многих технических, экономических и социальных областях. Обзор полученных результатов по этой тематике можно найти, например, в [1–6]. Одним из предъявляемых требований к СМО является качественное обслуживание заявок. В связи с этим возникает необходимость учитывать процедуру контроля качества обслуживания при оценке характеристик СМО. В работах [7–9] в предположении повторного обслуживания заявок в случае неудовлетворительного качества обслуживания исследованы однокомпонентные СМО, а в [10] — двухкомпонентная СМО. Данная статья является продолжением исследований автора [10] на случай многокомпонентной СМО.

Постановка задачи. В N -компонентную неоднородную СМО поступает простейший поток заявок с интенсивностью λ , т.е. время β между моментами поступления заявок имеет функцию распределения (ФР) $G(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ и плотность $g(t) = e^{-\lambda t}$, $t > 0$. Время α_k обслуживания

заявки k -м прибором имеет произвольную ФР $F_k(t) = P\{\alpha_k \leq t\}$ с плотностью распределения $f_k(t)$, $k = \overline{1, N}$. Если в момент поступления заявки в систему свободно несколько приборов, то с равной вероятностью она начинает обслуживаться любым из них. Если все приборы заняты обслуживанием, то поступающие в систему заявки теряются. Сразу же после окончания обслуживания каждой заявки мгновенно осуществляется контроль качества ее обслуживания. С вероятностью p_k обслуживание заявки k -м прибором признается успешным, и прибор переходит в режим ожидания следующей заявки. С вероятностью $q_k = 1 - p_k$ обслуживание заявки признается неудовлетворительным, и прибор немедленно приступает к повторному обслуживанию заявки. Время повторного обслуживания — СВ γ_k с ФР $\Phi_k(t) = P\{\gamma_k \leq t\}$ и плотностью $\phi_k(t)$, $k = \overline{1, N}$. После повторного обслуживания с вероятностью p_k обслуживание признается успешным, а с вероятностью q_k заявка отправляется на повторное обслуживание. Процесс обслуживания заявки повторяется до тех пор, пока обслуживание не будет признано успешным. Предполагается, что СВ α_k и γ_k независимы, имеют конечные математические ожидания $M\alpha_k$ и $M\gamma_k$ соответственно.

Цель работы — построить математическую модель функционирования системы; найти финальные вероятности пребывания системы в различных физических состояниях, определить среднее стационарное время пребывания в состоянии полной загрузки и исследовать влияние качества обслуживания заявок на эти характеристики.

Построение математической модели. Для построения математической модели используем аппарат теории полумарковских процессов с дискретно-непрерывным множеством состояний [11,12]. Полумарковский процесс (ПМП) $S(t)$ определим с помощью процесса марковского восстановления $\{S_n, \Theta_n; n \geq 0\}$, где $\{S_n; n \geq 0\}$ — вложенная цепь Маркова (ВЦМ), Θ_n — времена пребывания полумарковского процесса в состояниях.

Определение фазового пространства E рассматриваемой системы начнем с описания ее физических состояний. Каждый прибор может находиться в следующих состояниях: 1_1 — прибор обслуживает заявку первый раз; 1_2 — прибор обслуживает заявку повторно; 0 — прибор свободен. Физические состояния всей системы описываются N -мерным вектором $\bar{d} = (d_1, \dots, d_N)$, k -я компонента которого указывает на

физическое состояние k -го прибора, т.е. $d_k = 0, 1_1, 1_2$; $k = \overline{1, N}$. Для того чтобы в моменты изменения физических состояний система обладала марковским свойством, расширим фазовое пространство физических состояний добавлением непрерывных составляющих и перед вектором $\bar{d}$ укажем номер i прибора, который изменил свое физическое состояние последним. В результате фазовое пространство состояний будет иметь вид $E = \{i\bar{d}\bar{x}, i = \overline{1, N}\}$, где $\bar{x} = (x_1, \dots, x_N)$ — вектор, координаты которого указывают на время, оставшееся до момента ближайшего контроля качества обслуживания заявки соответствующим прибором. Очевидно, что $x_k = 0$, если $d_k = 0$. Кроме того, $x_i = 0$ в момент принятия к обслуживанию заявки i -м прибором как в первый раз, так и повторно.

Определим времена пребывания системы в состояниях. Для этого введем обозначения для вектора $i\bar{d}\bar{x}$: $\omega_j = \bigwedge_{x_k > 0} x_k$ ($\wedge$ — знак минимума),

j — номер прибора, на котором достигается минимум; $\Omega_d^{1_1}, \Omega_d^{1_2}, \Omega_d^0$ — совокупности номеров вектора $\bar{d}$, равных $1_1, 1_2$ и 0 соответственно; $\Omega_d^{1_1, 1_2} = \Omega_d^{1_1} \cup \Omega_d^{1_2}$; $|\bar{d}_0|$ — число нулевых компонент вектора $\bar{d}$ (число элементов множества Ω_d^0), т.е. число свободных приборов в системе. С учетом введенных обозначений время пребывания системы в состоянии $i\bar{d}\bar{x}$ определяется формулой

$$\Theta_{i\bar{d}\bar{x}} = \begin{cases} \beta \wedge \alpha_i \wedge \omega_j, & d_i = 1_1, \\ \beta \wedge \gamma_i \wedge \omega_j, & d_i = 1_2, \\ \beta \wedge \omega_j, & d_i = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Если какое-либо из множеств Ω_d^m ($m = 1_1, 1_2, 0$) пустое, то соответствующая составляющая в (1) отсутствует. Так, в случае $\Omega_d^0 = \emptyset$, т.е. когда $|\bar{d}_0| = 0$, в (1) будет отсутствовать СВ β — время между поступлениями заявок.

Опишем переходные вероятности ВЦМ $\{S_n; n \geq 0\}$. Стохастические соотношения (1) означают, что времена пребывания полумарковского процесса $S(t)$ в состояниях определяются минимумом СВ, а события переходов ВЦМ из одного состояния в другие — реализациями минимума этих величин.

Рассмотрим, например, состояние $i\bar{d}x$ в случае, когда $d_i = 1_1$, $|\bar{d}_0| \neq 0$. События переходов из этого состояния определяет реализация минимума $\beta \wedge \alpha_i \wedge \omega_j$. Если $\Theta_{i\bar{d}x} = \alpha_i$, то система переходит в состояния $i\bar{d}'x'$ с плотностью вероятности

$$p\{i\bar{d}x \rightarrow i\bar{d}'x'\} = \begin{cases} p_i f_i(y) \bar{G}(y), & d'_i = 0, \\ q_i f_i(y) \bar{G}(y), & d'_i = 1_2, \end{cases}$$

где $y < \omega_j$, $\bar{G}(y) = 1 - G(y)$, $d'_k = d_k$, $k \neq i$, $x'_k = \begin{cases} x_k - y, & k \in \Omega_d^{1_1, 1_2}, k \neq i, \\ 0, & k \notin \Omega_d^{1_1, 1_2}, k = i. \end{cases}$

В случае $\Theta_{i\bar{d}x} = \omega_j$ имеем

$$p\{i\bar{d}x \rightarrow j\bar{d}'x'\} = \begin{cases} p_j f_i(\omega_j + y) \bar{G}(\omega_j), & d'_j = 0, \\ q_j f_i(\omega_j + y) \bar{G}(\omega_j), & d'_j = 1_2, \end{cases}$$

где $y > 0$, $j \in \Omega_d^{1_1, 1_2}$, $j \neq i$, $d'_k = d_k$, $k \neq j$, $x'_k = \begin{cases} x_k - \omega_j, & k \in \Omega_d^{1_1, 1_2}, k \neq i, j, \\ y, & k = i, \\ 0, & k \in \Omega_d^0, k = j. \end{cases}$

Если $\Theta_{i\bar{d}x} = \beta$, то

$$p\{i\bar{d}x \rightarrow s\bar{d}'x'\} = \frac{1}{|\bar{d}_0|} g(y) f_i(y + x'_i),$$

где $y < \omega_j$, $x'_i > 0$, $s \in \Omega_d^0$, $d'_s = 1_1$, $d'_k = d_k$, $k \neq s$, $x'_k = \begin{cases} x_k - y, & k \in \Omega_d^{1_1, 1_2}, k \neq i, \\ x'_i, & k = i, \\ 0, & k \in \Omega_d^0. \end{cases}$

Аналогично выписываются вероятности и плотности вероятностей переходов из остальных состояний. Очевидно, что в случае пустого подмножества Ω_d^m ($m = 1_1, 1_2, 0$) соответствующий множитель в выражении для плотности вероятности перехода отсутствует. Например, в случае $|\bar{d}_0| = 0$ отсутствует множитель $\bar{G}(y)$.

Стационарное распределение вложенной цепи Маркова находится из системы уравнений

$$\rho(B) = \int_E \rho(dx) P(x, B), \quad (2)$$

где $P(x, B)$ — вероятность перехода из состояния x во множество состояний B ; $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Обозначим $\rho(i\bar{d}\bar{x})$ стационарные плотности состояний $i\bar{d}\bar{x}$. Выпишем одно из уравнений системы (2) для состояния $i\bar{d}\bar{x}$, когда $d_i = 1_1$, $\Omega_d^m \neq \emptyset$, $m = 1_1, 1_2, 0$:

$$\begin{aligned} \rho(i\bar{d}\bar{x}) = & \frac{1}{|\bar{d}'_0|} \int_0^\infty g(t) \varphi_i(t) \rho[i\bar{d}'(\bar{x} + t)] dt + \sum_{m \in \Omega_d^0} \frac{1}{|\bar{d}'_0|} \int_0^\infty g(t) \rho[m\bar{d}'(\bar{x} + t)] dt + \\ & + \sum_{\substack{m \in \Omega_d^{1_1} \\ m \neq i}} \frac{1}{|\bar{d}'_0|} \int_0^\infty g(t) f_m(x_m + t) \rho[m\bar{d}'(\bar{x} + t)] dt + \\ & + \sum_{m \in \Omega_d^{1_2}} \frac{1}{|\bar{d}'_0|} \int_0^\infty g(t) \varphi_m(x_m + t) \rho[m\bar{d}'(\bar{x} + t)] dt. \end{aligned}$$

Здесь $d'_i = 0$, $d'_k = d_k$, $k \neq i$; $[(\bar{x} + t)]_k = \begin{cases} x_k + t, & x_k > 0, \\ 0, & x_k = 0. \end{cases}$

Теорема 1. Стационарное распределение вложенной цепи $\{S_n, n \geq 0\}$ полумарковского процесса $S(t)$ определяется выражениями:

$$\rho(i\bar{d}\bar{x}) = \begin{cases} \rho_0 \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \prod_{\substack{k \in \Omega_d^{1_1} \\ k \neq i}} \bar{F}_k(x_k) \prod_{k \in \Omega_d^{1_2}} \frac{q_k}{p_k} \bar{\Phi}_k(x_k), & i \in \Omega_d^{1_1}, \\ \rho_0 \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \frac{q_i}{p_i} \prod_{k \in \Omega_d^{1_1}} \bar{F}_k(x_k) \prod_{\substack{k \in \Omega_d^{1_2} \\ k \neq i}} \frac{q_k}{p_k} \bar{\Phi}_k(x_k), & i \in \Omega_d^{1_2}, \\ \rho_0 \frac{(|\bar{d}_0| - 1)!}{\lambda^{|\bar{d}_0| - 1}} \prod_{k \in \Omega_d^{1_1}} \bar{F}_k(x_k) \prod_{k \in \Omega_d^{1_2}} \frac{q_k}{p_k} \bar{\Phi}_k(x_k), & i \in \Omega_d^0, \end{cases} \quad (3)$$

где постоянная ρ_0 находится из условия нормировки.

В справедливости утверждения теоремы можно убедиться непосредственной подстановкой выражений (3) в систему интегральных уравнений (2).

Стационарные вероятности состояний. Обозначим через D множество всех физических векторов $\bar{d}$, описывающих состояния

системы, а через D^* — некоторое его подмножество. Пусть $E_{D^*} = \{i\bar{d}x, i = \overline{1, N}, \bar{d} \in D^*\}$ — подмножество фазовых состояний системы, дискретная составляющая которых принадлежит D^* . Известно, что в случае существования единственного распределения ВЦМ $\{S_n, n \geq 0\}$ стационарные вероятности $\pi(D^*)$ пребывания системы в подмножествах состояний D^* определяются выражениями [11,12]

$$\pi(D^*) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{S(t) \in E_{D^*} / S(0) = x\} = \int_{E_{D^*}} m(x) \rho(dx) \left(\int_E m(x) \rho(dx) \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $m(x)$ — среднее время пребывания системы в состоянии $x \in E$, $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение ВЦМ. Найдем выражение для

$$\int_{E_{D^*}} m(x) \rho(dx) = \sum_{\bar{d} \in D^*} \int_{E_d} m(x) \rho(dx),$$

где E_d — подмножества фазовых состояний E с фиксированным вектором состояний $\bar{d}$. Заметим, что это подмножество содержит состояния, в которых свое физическое состояние последним изменил любой прибор. Кроме этого, если k -я компонента вектора $\bar{d}$ равна 1_1 или 1_2 , то E_d содержит как состояния, в которых $x_k = 0$, так и состояния, в которых $x_k > 0$.

При нахождении выражения для $\int_{E_d} m(x) \rho(dx)$ учтем, что среднее время $M[\Theta_{i\bar{d}x}]$ пребывания системы в состоянии $i\bar{d}x$ определяется формулами

$$M[\Theta_{i\bar{d}x}] = \begin{cases} \int_0^{\omega_j} \bar{G}(t) \bar{F}_i(t) dt, & i \in \Omega_d^{1_1}, \\ \int_0^{\omega_j} \bar{G}(t) \bar{\Phi}_i(t) dt, & i \in \Omega_d^{1_2}, \\ \int_0^{\omega_j} \bar{G}(t) dt, & i \in \Omega_d^0, \end{cases} \quad (5)$$

где $\omega_j = \bigwedge_{x_k > 0} x_k$. Если какое-либо из подмножеств $\Omega_d^{1_1}$, $\Omega_d^{1_2}$, Ω_d^0 — пустое, то соответствующее выражение под знаком интеграла в (5)

отсутствует. Учитывая, что $\bar{G}(t) = \lambda^{-1} g(t)$, соотношения (3) и (5), после преобразований получим

$$\int_{E_d} m(x) \rho(dx) = \rho_0 \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \prod_{k \in \Omega_d^{l_1}} M \alpha_k \prod_{k \in \Omega_d^{l_2}} \frac{q_k}{p_k} M \gamma_k.$$

Следовательно,

$$\pi(D^*) = \frac{\sum_{\bar{d} \in D^*} \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \prod_{k \in \Omega_d^{l_1}} M \alpha_k \prod_{k \in \Omega_d^{l_2}} \frac{q_k}{p_k} M \gamma_k}{\sum_{\bar{d} \in D} \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \prod_{k \in \Omega_d^{l_1}} M \alpha_k \prod_{k \in \Omega_d^{l_2}} \frac{q_k}{p_k} M \gamma_k}. \quad (6)$$

В результате преобразования сумм произведения средних формулу (6) можно переписать в виде

$$\pi(D^*) = \frac{\sum_{\bar{d} \in D^*} \frac{|\bar{d}_0|!}{\lambda^{|\bar{d}_0|}} \prod_{k \in \Omega_d^{l_1}} M \alpha_k \prod_{k \in \Omega_d^{l_2}} \frac{q_k}{p_k} M \gamma_k}{\sum_{n=0}^N \frac{(N-n)!}{\lambda^{N-n}} \sum_{\{s_1, \dots, s_n\}} \prod_{i=1}^n \left(M \alpha_{s_i} + \frac{q_{s_i}}{p_{s_i}} M \gamma_{s_i} \right)}, \quad (7)$$

где $\{s_1, \dots, s_n\}$ — некоторое сочетание из $\{1, \dots, N\}$ по n .

В частности, пусть n — число приборов в системе, занятых обслуживанием. Обозначим через D_n^* множество векторов, число ненулевых компонент которых равно n . Из (7) вытекает, что стационарная вероятность того, что n приборов заняты обслуживанием, равна

$$\pi_n^* = \pi(D_n^*) = \frac{\frac{(N-n)!}{\lambda^{N-n}} \sum_{\{s_1, \dots, s_n\}} \prod_{i=1}^n \left(M \alpha_{s_i} + \frac{q_{s_i}}{p_{s_i}} M \gamma_{s_i} \right)}{\sum_{j=0}^N \frac{(N-j)!}{\lambda^{N-j}} \sum_{\{s_1, \dots, s_j\}} \prod_{i=1}^j \left(M \alpha_{s_i} + \frac{q_{s_i}}{p_{s_i}} M \gamma_{s_i} \right)}. \quad (8)$$

В частности, при $n = N$, из формулы (8) получаем стационарную вероятность π_N^* того, что поступающая в систему заявка получит отказ в обслуживании:

$$\pi_N^* = \pi(D_N^*) = \frac{\prod_{k=1}^N \left(M\alpha_k + \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k \right)}{\sum_{j=0}^N \frac{(N-j)!}{\lambda^{N-j}} \sum_{\{s_1, \dots, s_j\}} \prod_{i=1}^j \left(M\alpha_{s_i} + \frac{q_{s_i}}{p_{s_i}} M\gamma_{s_i} \right)}. \quad (9)$$

Исходя из формулы (7) определим стационарные вероятности состояний системы с учетом характера обслуживания заявок. Пусть D_{km}^* – подмножество физических состояний системы, когда k приборов обслуживают заявки первый раз, а m приборов — повторно, $k + m = n$, n – число приборов занятых обслуживанием. Тогда стационарная вероятность таких состояний равна

$$\pi_{km}^* = \pi(D_{km}^*) = \frac{\frac{(N-n)!}{\lambda^{N-n}} \sum_{\{\tau_1, \dots, \tau_k\}} \prod_{i=1}^k M\alpha_{s_i} \sum_{\{\sigma_1, \dots, \sigma_m\}} \prod_{i=1}^m \frac{q_{\sigma_i}}{p_{\sigma_i}} M\gamma_{\sigma_i}}{\sum_{n=0}^N \frac{(N-n)!}{\lambda^{N-n}} \sum_{\{s_1, \dots, s_n\}} \prod_{i=1}^n \left(M\alpha_{s_i} + \frac{q_{s_i}}{p_{s_i}} M\gamma_{s_i} \right)}, \quad (10)$$

где $\{\tau_1, \dots, \tau_k\}$ — сочетание из множества номеров занятых обслуживанием приборов $\{s_1, \dots, s_n\}$ по k , а $\{\sigma_1, \dots, \sigma_m\}$ — сочетание из множества оставшихся номеров $\{s_1, \dots, s_n\} \setminus \{\tau_1, \dots, \tau_k\}$ по m . В случае однородной системы, т.е. когда $M\alpha_k = M\alpha$, $M\gamma_k = M\gamma$, $p_k = p$, $k = \overline{1, N}$, формула (10) принимает вид

$$\pi_{km}^* = \frac{(\lambda M\alpha)^k (qp^{-1}\lambda M\gamma)^m}{k!m! \sum_{n=0}^N \frac{(\lambda M\alpha + qp^{-1}\lambda M\gamma)^n}{n!}}.$$

Среднее стационарное время пребывания системы в состоянии полной загрузки. Данную характеристику системы найдем с помощью формулы [11,12]

$$T_N^* = T(D_N^*) = \int_{E_{D_N^*}} m(x) \rho(dx) \left(\int_{E_{D_N^*}} \rho(dx) P(x, E \setminus E_{D_N^*}) \right)^{-1}. \quad (11)$$

В результате преобразований интеграла в знаменателе дроби (11) с учетом вероятностей переходов системы из состояний и стационарного распределения вложенной цепи Маркова получаем

$$\begin{aligned} \int_{E_{D_N}^*} \rho(dx) P(x, E \setminus E_{D_N}) &= \sum_{\bar{d} \in D_N^*} \sum_{i=1}^N \int_{R_x^+} \rho(i\bar{d}x) P(i\bar{d}x, E \setminus E_d) = \\ &= \sum_{\bar{d} \in D_N^*} \left(\sum_{i \in \Omega_d^{1_1}} p_i \prod_{\substack{k \in \Omega_d^{1_1} \\ k \neq i}} M\alpha_k \prod_{k \in \Omega_d^{1_2}} \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k + \sum_{i \in \Omega_d^{1_2}} q_i \prod_{k \in \Omega_d^{1_1}} M\alpha_k \prod_{\substack{k \in \Omega_d^{1_2} \\ k \neq i}} \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k \right) = \\ &= \sum_{i=1}^N \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \left(M\alpha_k + \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k \right), \end{aligned}$$

где $\int_{R_x^+} d\bar{x} = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \underbrace{dx_{s_1} \dots dx_{s_m}}_{x_{s_1} > 0 \dots x_{s_m} > 0}.$

Таким образом,

$$T_N^* = \frac{\prod_{k=1}^N \left(M\alpha_k + \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k \right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \left(M\alpha_k + \frac{q_k}{p_k} M\gamma_k \right)} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{M\alpha_i + \frac{q_i}{p_i} M\gamma_i} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Пример. В четырехканальную систему обслуживания поступает простейший поток заявок с интенсивностью $\lambda = 10 \text{ ч}^{-1}$. Средние времена обслуживания заявок приборами первый раз и повторно соответственно равны $M\alpha_1 = 0,35 \text{ ч}$, $M\alpha_2 = 0,31 \text{ ч}$, $M\alpha_3 = 0,42 \text{ ч}$, $M\alpha_4 = 0,38 \text{ ч}$ и $M\gamma_1 = 0,32 \text{ ч}$, $M\gamma_2 = 0,25 \text{ ч}$, $M\gamma_3 = 0,36 \text{ ч}$, $M\gamma_4 = 0,31 \text{ ч}$. Вероятности качественного обслуживания заявок приборами $p_1 = 0,8$, $p_2 = 0,9$, $p_3 = 0,95$ и $p_4 = 0,97$ соответственно. Вычисление стационарных характеристик по формулам (8) и (12) приводит к следующим результатам:

$$\pi_0^* = 0,028, \pi_1^* = 0,114, \pi_2^* = 0,232, \pi_3^* = 0,312, \pi_4^* = 0,314, T_4^* = 0,974 \text{ ч}.$$

В случае отсутствия контроля качества обслуживания аналогичные характеристики π_n и T_4 равны

$$\begin{aligned} \pi_0 &= 0,034, \pi_1 = 0,130, \pi_2 = 0,245, \pi_3 = 0,306, \pi_4 = 0,285, \\ T_4 &= 0,901 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Таким образом, наличие в системе процедуры контроля качества обслуживания увеличивает вероятность отказа в обслуживании на 10,175%, длительность времени полной загрузки системы на 8,602%, но гарантирует качественное обслуживание заявок.

Из формул (9) и (10) следует, что в случае полной загрузки системы вероятности того, что повторным обслуживанием заявок заняты один, два, три и все четыре прибора соответственно равны 0,235, 0,024, 0,0009 и 0,0001.

Заключение. Построен полумарковский процесс функционирования многоканальной системы обслуживания с потерями, в которой обслуживание заявок приборами проводится до тех пор, пока оно не будет признано качественным. Полученные расчетные формулы для вычисления стационарных характеристик системы позволяют оценить влияние вероятности качественного обслуживания заявок на показатели системы. Результаты статьи могут быть использованы для более адекватного описания функционирования современных технических и информационных систем в самых различных предметных областях.

Библиографический список

1. Бочаров П.П. Теория массового обслуживания / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
2. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
3. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания / Г.П. Климов. – М.: Наука, 1966. – 244 с.
4. Матвеев В.Ф. Системы массового обслуживания / В.Ф. Матвеев, В.Г. Ушаков. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 240 с.
5. Боровков А.А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1971. – 368 с.
6. Ивченко Г.И. Теория массового обслуживания / Г.И. Ивченко, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко. – М.: Высш. школа, 1982. – 256 с.
7. Peschansky A.I. Stationary Characteristics of the Single-Server Queue System with Losses and Immediate Service Quality Control / A.I. Peschansky // Applied Mathematics, 2011. – Vol.2, №4. – P.403–409.
8. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
9. Песчанский А.И. Стационарные характеристики одноканальной системы с неограниченной очередью и учетом контроля качества

-
- обслуживания / А.И. Песчанский // Изв. вузов. Приборостроение. – 2023. – Т.66, № 9. – С. 715–730.
10. Песчанский А.И. Стационарные характеристики двухкомпонентной системы обслуживания с потерями и контролем качества обслуживания / А.И. Песчанский // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2022. – № 4(20). – С. 30–38.
11. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
12. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.И. Новиков, А.Ф. Турбин. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Bocharov P.P. Teoriya massovogo obsluzhivaniya / P.P. Bocharov, A.V. Pechinkin. – M.: Izd-vo RUDN, 1995. – 529 s.
2. Gnedenko B.V. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya / B.V. Gnedenko, I.N. Kovalenko. – M.: Nauka, 1987. – 336 s.
3. Klimov G.P. Stohasticheskie sistemy obsluzhivaniya / G.P. Klimov. – M.: Nauka, 1966. – 244 s.
4. Matveev V.F. Sistemy massovogo obsluzhivaniya / V.F. Matveev, V.G. Ushakov. – M.: Izd-vo MGU, 1984. – 240 s.
5. Borovkov A.A. Veroyatnostnye processy v teorii massovogo obsluzhivaniya / A.A. Borovkov. – M.: Nauka, 1971. – 368 s.
6. Ivchenko G.I. Teoriya massovogo obsluzhivaniya / G.I. Ivchenko, V.A. Kashtanov, I.N. Kovalenko. – M.: Vyssh. shkola, 1982. – 256 s.
7. Peschansky A.I. Stationary Characteristics of the Single-Server Queue System with Losses and Immediate Service Quality Control / A.I. Peschansky // Applied Mathematics, 2011. – Vol.2, №4. – P.403–409.
8. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input / A.I. Peschansky. – Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. – 138 p.
9. Peschanskij A.I. Stacionarnye harakteristiki odnokanal'noj sistemy s neogranichennoj ochered'yu i uchetom kontrolya kachestva obsluzhivaniya / A.I. Peschanskij // Izv. vuzov. Priborostroenie. – 2023. – Т.66, № 9. – С. 715–730.
10. Peschanskij A.I. Stacionarnye harakteristiki dvuhkomponentnoj sistemy obsluzhivaniya s poteryami i kontrolem kachestva obsluzhivaniya / A.I. Peschanskij // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priporostroenii. – 2022. – № 4(20). – С. 30–38.

11. Korolyuk V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. dumka, 1982. – 236 s.
12. Korlat A.N. Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemyh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya / A.N. Korlat, V.N. Kuznecov, M.I. Novikov, A.F. Turbin. – Kishinev: Shtiinca, 1991. – 276 s.

Песчанский Алексей Иванович, д.т.н., профессор, профессор, peschansky_sntu@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STATIONARY CHARACTERISTICS OF A MULTI-SERVER LOSS QUEUING SYSTEM WITH REGARD TO SERVICE QUALITY CONTROL

A.I. Peschansky

The object of the study is a multi-server loss queuing system. Poisson incoming flow and arbitrary distributions of service times are considered. After each request service its quality control is carried out. In case of unsatisfactory service quality, the request undergoes recurrent service immediately. The service is repeated until it is regarded as satisfactory. The mathematical model of the queuing system operation is constructed. The final probabilities and the average stationary time the system remains in a fully loaded state are obtained.

Keywords: multi-server queuing system, service quality control, final probabilities of states, average stationary time the system remains in a fully loaded state

Peschansky Alersey Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor, peschansky_sntu@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ АНТРОПОМОРФНЫМ РОБОТОМ SAR-401 И ВЕДУЩИМ УСТРОЙСТВОМ, ОСНОВАННОМ НА ПРИНЦИПЕ КОПИРОВАНИЯ

Крамарь В.А.¹, Троицкая А.А.², Якунин Р.Д.³.

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного комплекса для обмена данными между антропоморфным роботом SAR-401 и ведущим устройством, основанном на принципе копирования. Метод передачи роботу информации о движении руки оператора основан на программном решении, связывающем в реальном времени данные с датчиков ведущего устройства и соответствующих двигателей манипулятора на SAR-401. На основе разработанного клиент-серверного программного решения можно организовать копирующий режим работы манипуляторов робота или режим работы "Программирование по демонстрации". При этом в алгоритм работы может быть включен режим управления самостолкновением манипуляторов. Режим контроля самостолкновения может осуществляться в реальном времени путем блокирования движения манипуляторов робота и выдачи соответствующего предупреждения оператору.

Ключевые слова. Антропоморфный робот, манипулятор, управление самостолкновением манипуляторов, копирующий режим.

Введение. В последнее время продолжает расти применение дистанционного управления роботами в различных неструктурированных средах [1]. Одним из современных подходов к подобному управлению сложными робототехническими комплексами с антропоморфными (многозвенными) манипуляторами является управление с помощью копирующего устройства [2]. В частности, для таких робототехнических комплексов как SAR-401 (**Рис.1**) в качестве управляющего устройства используется копирующий костюм (**Рис.2**) [3]. Кроме реализации дистанционного управления при повторении движений оператора при выполнении технологических операций, управление с помощью копирующего костюма может осуществляться на основе подхода «Programming by Demonstration» (PbD) [2] который обеспечивает естественный способ программирования роботов, показывая желаемую задачу.

Применение копирующего устройства позволяет оперативно, без построения достаточно сложных математических моделей, организовать

управление манипуляторами. Основной задачей, которую необходимо решить, является организация точной передачи движений оператора на манипуляторы робототехнического комплекса. Очевидно, что здесь возникает требование соответствия антропоморфных характеристик оператора и манипуляторов робототехнического комплекса [4].

В настоящей статье опишем принцип реализации обмена данными между копирующим костюмом и роботом SAR-401.

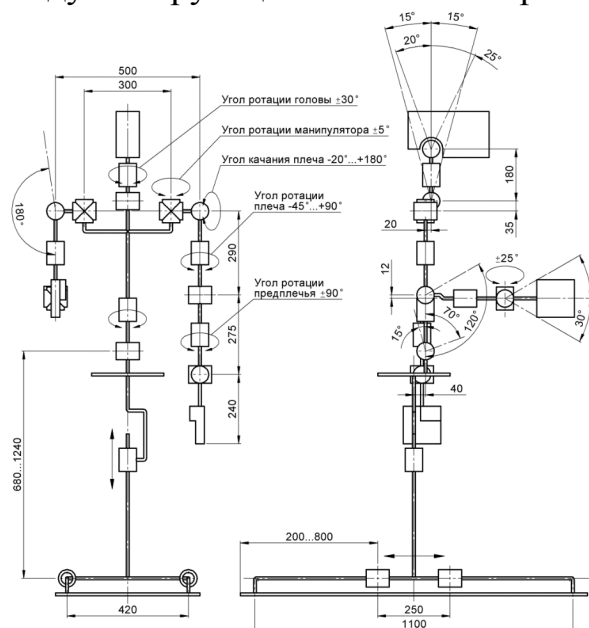


Рис.1 – Схема робота SAR-401



Рис.2 – Копирующий костюм для робота SAR-401

Получение данных с копирующего устройства.

Управление РТК осуществляется путем получения данных с чувствительных элементов копирующего костюма – датчиков. Методика передачи информации роботу о движении рук оператора основана на построении связи между датчиками копирующего костюма и соответствующими двигателями манипулятора РТК. Отображение показаний датчика на требуемые углы поворота нетождественно, поскольку пространство входного состояния имеет большой размер, а неизвестная целевая функция является нелинейной. Подобное отображение называется отображением «2m-to-n» и имеет вид представленный на **Рис.3** [5, 6].

$$[b_1 t_1 b_2 t_2 \dots b_m t_m]^T \Rightarrow \text{Learning algorithm} \Rightarrow [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_n]^T, \quad (1)$$

где b_m и t_m – углы изгиба и скручивания соответственно для каждого из датчиков, а θ_n – угол поворота для каждого из сочленений манипулятора.

Получение данных с копирующего устройства осуществляется путем построения клиент-серверного программного решения, состоящего из управляющего сервера и клиентской программы, для взаимодействия аппаратных частей костюма и модуля программы. В ходе работы осуществляется прослушивание сетевых пакетов, поступающих с IP-адреса 127.0.0.1 и порта 10003 по протоколу UDP и последующее преобразование полученных пакетов в данные.

Пакет данных от копирующего костюма представляет собой массив байт, структура которого определяется в файле настроек программы и может варьироваться в зависимости от решаемой задачи. Структура типового пакета делится на три части, первая часть кадра отвечает за текущую временную метку, которой соответствует зарегистрированный сигнал датчика, далее следует текстовая метка – идентификатор датчика и соответствующее числовое значение – зарегистрированный сигнал датчика.

Особенность работы датчиков состоит в том, что числовые значения, соответствующие углам поворота управляющих устройств РТК, приходят в «сыром» «RawData» («сыром») формате. Указанные числовые последовательности трансформируются в значения, соответствующие реальному углу поворота управляющих двигателей. Окончательный расчет зарегистрированного сигнала от датчика копирующего костюма выполняется на основе соотношения

$$realDataValue = (rawDataValue + offset) \times K, \quad (2)$$

где коэффициенты K и $offset$ – атрибуты, которые используются для пересчета значений в RawData формате в реальные значения углов поворота исполнительных устройств.

Программа-клиент, осуществляет связь с копирующим костюмом и позволяет регистрировать потоки «RawData» данных от датчиков костюма, и производить перерасчет сырых данных в действительные значения углов поворота в реальном масштабе времени.

Передача команд на РТК. Передача данных на РТК осуществляется с помощью управляющих команд по протоколу TCP (подключение осуществляется к IP-адресу 127.0.0.1, порт номер 10099).

В качестве транспортного протокола используется протокол TCP. Все символы команд и ответов представлены в однобайтной символьной кодировке ASCII, а все численные значения, передаваемые и возвращаемые, являются целочисленными 16-битными числами и передаются как последовательность символов в диапазоне от 0x30 до 0x39.

При этом если число имеет знак, то он ставится перед числом и определяется символом 0x2D. Каждая команда, которая послана для управлением РТК, должна заканчиваться символами – терминаторами 0x0D и 0x0A. Максимальная длина команды, с учетом терминатора строки, составляет 1024 байта.

Группа команд ROBOT служит для управления роботом и включает в себя несколько подгрупп: MOTORS, SENSORS, MUTE.

Для управления роботом в нашем случае будем пользоваться только командой MOTORS. Подгруппа команд ROBOT:MOTORS служит для управления приводами (степенями подвижности) робота и включает в себя несколько команд:

- POSSET – переводит выбранные приводы в режим управления по положению и устанавливает требуемый угол. ПИД регулятор задает ШИМ (Широтно-импульсная модуляция) в зависимости от коэффициентов регулятора и ошибки между текущим и заданным положением;

- PWM – задает значение ШИМ выбранным степеням подвижности;

- GO – выполняет перемещение выбранных приводов из текущего в требуемое положение за указанное время. Интерполяция линейная. Для нелинейной интерполяции промежуточных точек, вместо GO используйте команды: GOSin, GOCos или GOSigm;

- POSGET – возвращает текущее положение выбранных приводов, через разделитель 0x3B;

- BREAK – отключает режим слежения по положению.

Поскольку программа будет передавать команды на движение в реальном времени, поэтому для управления РТК будет использована подгруппа команд POSSET, которая переводит выбранные приводы на требуемый угол за минимальное возможное время с максимальной скоростью.

Для передачи данных на движения РТК, команда должна иметь вид:

ROBOT:MOTORS:{Название узла}: POSGET.

Так же каждая запрошенная команда сопровождается кодом ответа, размером в байт. Если команда подразумевает возврат результата в виде значений или строки, как в случае с командой POSGET, то, в случае ее успешного выполнения, сначала будет возвращен код ответа (0xF1), затем последует результат выполнения команды, который заканчивается символами – терминаторами (0x0D) и (0x0A). Если команда не подразумевает возврата результата, то в случае ее успешного выполнения будет возвращен код ответа (0xF0). В случае если команда завершилась ошибкой, будет возвращен соответствующий код ошибки.

Программа взаимодействия с копирующим костюмом РТК. Для работы использовался язык программирования высокого уровня С#, в качестве среды разработки использовалась IDE Microsoft VisualStudio 2019 Community Edition.

Обобщенная структура системы управления РТК, приведена на **Рис.3**.

В соответствии со структурной схемой, система управления РТК с возможностью предотвращения столкновений состоит из нескольких контуров: сбора, обработки и отправки данных.

Первый контур предназначен для сбора данных с копирующего костюма в результате которого формируются числовые значения, соответствующие углам поворота управляющих устройств РТК.

Второй контур предназначен для обработки полученных данных для определения наличия столкновения манипуляторов друг с другом.

Третий контур является контуром управления, непосредственно воздействующим на управляющие устройства РТК.

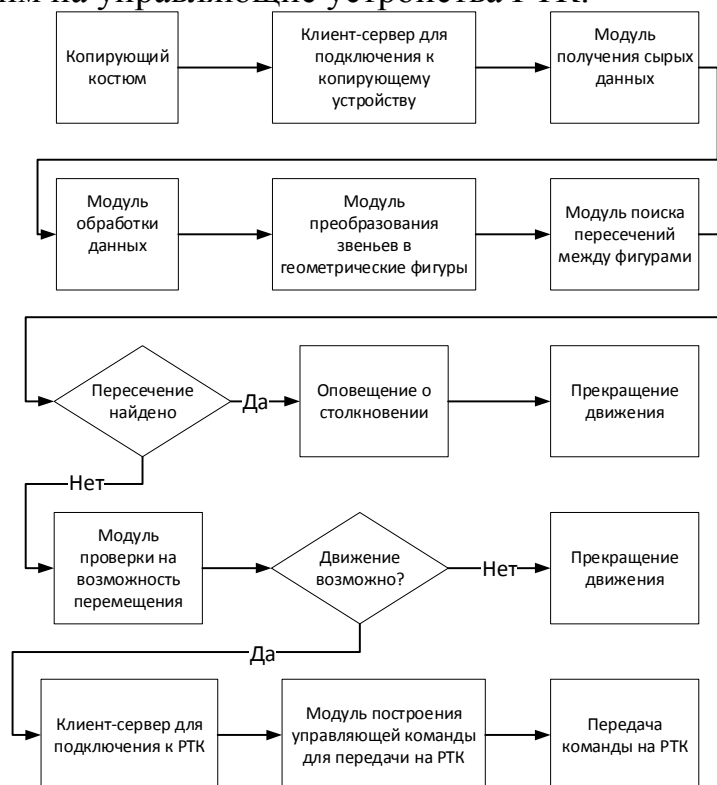


Рис.3 – Структурная схема программы

Следует отметить, что работа программы-клиента копирующего костюма и программы-клиента РТК происходит одновременно. Работа

системы предусматривается в автоматическом режиме, прогнозирование самостолкновений происходит в реальном времени.

Для обеспечения совместимости между программными модулями программного комплекса РТК разработаны и стандартизированы в рамках программного комплекса специализированные библиотеки, позволяющие выполнять операции чтения и записи в дуплексном и симплексном режимах между копирующим костюмом, клиентской программой и РТК.

К ним относятся классы для управления костюмом, класс для описания состояния датчика CostumeJoint, класс для описания структуры «сырых» данных от датчика PackedData, класс для работы с РТК Robot, класс описания параметров Денавита-Хантерберга, класс описания поиска столкновения.

Интерфейс программы приведен на Рис.4.

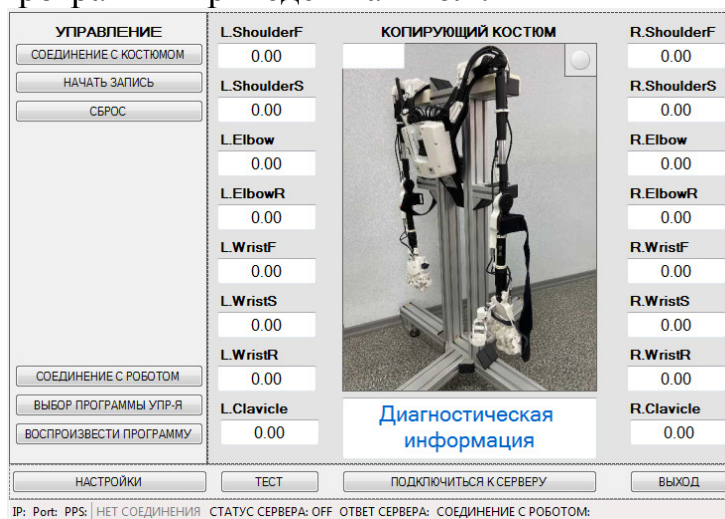


Рис.4 – Структурная схема программы

Методика прогнозирования самостолкновения по контролю движения ЭО РТК.

Основываясь на описанных выше методических подходах к прогнозированию самостолкновения укажем отдельные этапы методики контроля и недопущения самостолкновения при движении ЭО РТК.

1. Реализация клиент-серверного решения, осуществляющего прослушивание сетевых пакетов, поступающих с IPадреса 127.0.0.1 и порта 10003 по протоколу UDP.

2. Построение конфигурационного файла в xml-формате, содержащего коэффициенты, которые отвечают за преобразование «сырых» данных в реальные значения.

4. Регистрация потоков сырых данных в виде оцифрованных сигналов от датчиков костюма.

5. Перерасчет сырых данных в действительные значения углов поворота в реальном масштабе времени.

6. Нахождение координат положения всех звеньев манипулятора.

7. Аппроксимация звеньев в цилиндры, между которыми будет производиться поиск на пересечения.

8. Выполнение метода определения столкновений цилиндров в трехмерной плоскости.

Этот этап использует алгоритм анализа самостолкновения, основанный на анализе расстояния между скрещивающихся прямых, моделирующих оси цилиндров, которые описывают звенья манипуляторов (**Рис.5**)

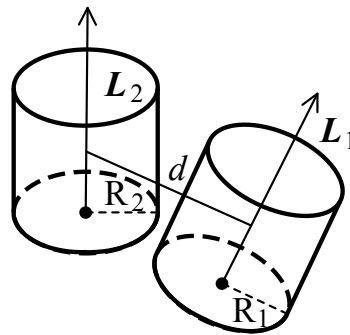


Рис.5 – Цилиндры, как звенья манипуляторов робота

На **Рис.5** L_1 и L_2 скрещивающиеся векторы, определяющиеся каноническими уравнениями

$$L_1(t_1) = P_1 + t_1 V_1, \quad L_2(t_2) = P_2 + t_2 V_2, \quad (3)$$

где $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$ - радиус-векторы, определяющие начальные точки векторов, $V_1 = (l_1, m_1, n_1)$, $V_2 = (l_2, m_2, n_2)$ - направляющие векторы, $0 \leq t_1 \leq l$, $0 \leq t_2 \leq l$ вещественный коэффициент.

Расстояние d между скрещивающимися векторами описывается соотношением

$$d = \frac{|((P_2 - P_1) \cdot [V_1 \times V_2])|}{\|V_1 \times V_2\|}. \quad (4)$$

Если выполняется условие $d > R_1 + R_2$ (где R_1 и R_2 радиусы цилиндров для звеньев левого и правого манипулятора соответственно, **Рис.5**), тогда эти звенья не сталкиваются.

Проверка осуществляется на пересечение всех звеньев первого манипулятора со всеми звеньями второго.

9. Обработка данных, в случае обнаружения столкновения, следующие пункты не выполняются.

10. Проверка на возможность выполнения движения РТК – проверяется ограничения на физические возможности РТК (лимиты), если движение невозможно оно не выполняется.

11. Реализация клиент-серверного решения, осуществляющего отправку сетевых пакетов, на IPадрес 127.0.0.1 и порт 10099 по протоколу TCP/IP.

12. Построение управляющей команды для передачи управляющих последовательностей на исполнительные устройства робота

Заключение. Рассмотрены и предложены подходы к разработке аппаратно-программной системы корнтроля самостолкновения многозвенных манипуляторов робота SAR-401. Предлагаемый подход основан на получении данных в формате «RawData» с чувствительных элементов копирующего костюма при построении копирующего управления. Далее данные трансформируются в значения, соответствующие реальному углу поворота управляющих двигателей. На основании полученных данных, используя решение прямой задачи кинематики, проводится анализ на возможность возникновения самостолкновения. Если столкновений не обнаружено, то управляющие данные с копирующего костюма подаются на манипуляторы робота. Если же обнаружена возможность самостодлкновения, то движение манипуляторов блокируются до принятия решения оператором.

Библиографический список

1. Liu Y. Brain-computer interface for hands-free teleoperation of construction robots / Y. Liu, M. Habibnezhad, H. Jebelli // Autom. Constr. 2021, – 123. – 103523.
2. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 – 1611 p.
3. Zhidenko I.G. Explanation of structural scheme selection of space application robots / I.G. Zhidenko // Reshetnev's readings: materials of XVI International Scientific Conference, dedicated to the member of the academy, MF Reshetnev (November 12-14, 2013, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University. – 2013. – pp. 278-280.
4. Otani T. Optimization of Link Length Fitting between an Operator and a Robot with Digital Annealer for a Leader-Follower Operation / T. Otani, A. Takanishi, M. Nakamura, K. Kimura // Robotics. –2022. – 11(1). – 12 p.
5. Skoglund A. Programming by Demonstration of Robot Manipulators / A. Skoglund. – Orebro University, Sweden, 2009. – 183p.
6. Kramar V. The frequency method of analysis of stability of the multidimensional automatic control system / V. Kramar // Annals of

DAAAM for 2009 and 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Theory, Practice and Education" 25 November 2009 до 28 November 2009. – pp. 769

7. Kramar, V. Application of Linear Algebra Approaches for Predicting Self-Collisions of Dual-Arm Multi-Link Robot / V. Kramar, A. Kabanov, V. Alchakov // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2020. – V.9(11). – pp. 1521 – 1525.

Bibliograficheskij spisok

1. Liu Y. Brain-computer interface for hands-free teleoperation of construction robots / Y. Liu, M. Habibnezhad, H. Jebelli // Autom. Constr. 2021, – 123. – 103523.
2. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 – 1611 p.
3. Zhidenko I.G. Explanation of structural scheme selection of space application robots / I.G. Zhidenko // Reshetnev's readings: materials of XVI International Scientific Conference, dedicated to the member of the academy, MF Reshetnev (November 12-14, 2013, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University. – 2013. – pp. 278-280.
4. Otani T. Optimization of Link Length Fitting between an Operator and a Robot with Digital Annealer for a Leader-Follower Operation / T. Otani, A. Takanishi, M. Nakamura, K. Kimura // Robotics. – 2022. – 11(1). – 12 p.
5. Skoglund A. Programming by Demonstration of Robot Manipulators / A. Skoglund. – Orebro University, Sweden, 2009. – 183p.
6. Kramar V. The frequency method of analysis of stability of the multidimensional automatic control system / V. Kramar // Annals of DAAAM for 2009 and 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Theory, Practice and Education" 25 November 2009 до 28 November 2009. – pp. 769
7. Kramar, V. Application of Linear Algebra Approaches for Predicting Self-Collisions of Dual-Arm Multi-Link Robot / V. Kramar, A. Kabanov, V. Alchakov // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2020. – V.9(11). – pp. 1521 – 1525.

¹*Крамарь Вадим Александрович, д.т.н., профессор, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Троицкая Анастасия Андреевна, ассистент, aatroitskaya@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³Якуини Роман Денисович, ассистент, младший научный сотрудник, goodromal404@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

A SOFTWARE PACKAGE FOR DATA EXCHANGE BETWEEN AN ANTHROPOMORPHIC SAR-401 ROBOT AND A MASTER DEVICE BASED ON THE PRINCIPLE OF COPYING

V.A. Kramar, A.A. Troitskaya, R.D. Yakunin

The article discusses the development of a software package for data exchange between an anthropomorphic SAR-401 robot and a master device based on the principle of copying. The method of transmitting information about the movement of the operator's hand to the robot is based on a software solution that connects real-time data from the sensors of the master device and the corresponding manipulator motors on the SAR-401. Based on the developed client-server software solution, it is possible to organize a copying mode of operation of the robot manipulators or a "Demonstration programming" mode of operation. At the same time, the control mode of the collision of manipulators itself can be included in the algorithm of operation. The self-collision control mode can be carried out in real time by blocking the movement of the robot's manipulators and issuing an appropriate warning to the operator

Keywords: anthropomorphic robot, manipulator, manipulator self-collision control, copying mode.

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

Troitskaya Anastasia Andreevna, assistant, aatroitskaya@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Yakuini Roman Denisovich, assistant, junior researcher, goodromal404@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК К РАСПРЕДЕЛЕННОЙ БАЗЕ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Заморёнов М.В.¹, Шаталова Ю.Г.²

Аннотация. *Анализируются модели организации взаимодействия клиентов и распределенной базы данных завода. Обосновывается выбор трехуровневой модели. Строится имитационная модель выбранной архитектуры с использованием языка моделирования Anylogic-ple-8.6.0.x86_64. Проводится анализ построенной модели. Предлагаются возможные варианты улучшения модели в случае сбоев при увеличении интенсивности потока заявок*

Ключевые слова: *распределенная база данных, сервер приложений, инструментарий AnyLogic*

Базы данных (БД) лежат в основе практически всех современных информационных систем. Если речь идет о базе данных крупного промышленного предприятия, то необходимо построение распределенной базы данных (РБД). Это обусловлено и семантикой предметной области, и практической необходимостью. Различные объекты одной базы данных могут располагаться на удаленных компьютерах и управляться различными системами управления базами данных (СУБД).

Вместе с тем основные требования к базам данных сохраняются: данные БД в каждый момент времени должны быть непротиворечивыми и актуальными; БД должна соответствовать правилам предметной области, законам, по которым она функционирует; требуется контроль за состоянием БД, внесение изменений во все реплики, корректная реакция на сбои. Необходима синхронизация работы всех компьютеров, хранящих данные базы [1].

Помимо перечисленных требований в РБД необходимо управлять поступающими запросами: проводить их идентификацию, отслеживать права доступа, организовывать выдачу непротиворечивых данных, решать вопросы конкуренции за ресурсы БД и т.д.

Таким образом, на работу РБД накладывается дополнительная нагрузка, помимо вышеперечисленных функций, РБД должна выполнять ещё и классические функции СУБД: обработка запросов и транзакций пользователей. Из всего сказанного следует, что проблема выбора модели организации системы распределенной базы данных является актуальной задачей.

Целью исследования является анализ характеристик моделей взаимодействия клиентов с РБД, выбор наиболее эффективной архитектуры построения системы распределенной базы данных промышленного предприятия, построение и анализ имитационной модели выбранной архитектуры на примере отдела снабжения завода.

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие действия: проанализировать имеющиеся архитектуры организации РБД; разработать математическую модель выбранной архитектуры; построить имитационную модель взаимодействия; организовать проведение эксперимента при изменении интенсивности поступления заявок от пользователей; на основании экспериментов собрать статистику поведения модели; провести анализ собранных данных; сформулировать предложения по повышению эффективности работы системы.

В основе работы распределенной системы лежит модель «клиент -- сервер» [2]. Как правило, клиенты и сервер располагаются на различных, возможно удаленных, компьютерах. В нашем случае речь идет о распределенной базе данных завода, а точнее его отдела снабжения. Отдел снабжения занимается заключением договоров с поставщиками необходимых деталей, отслеживает наличие комплектующих на складе, принимает и отрабатывает заказы от подразделений завода; т.е. работает с большим потоком данных. Поэтому необходимо организовать работу РБД таким образом, чтобы обеспечить устойчивый режим работы, без сбоев, позволяющий гарантированно обработать запросы пользователей. Анализ литературных источников позволил выделить следующие модели взаимодействия клиентов и сервера РБД [3]: 1) модель удаленного управления данными; 2) модель файлового сервера; 3) модель сервера базы данных; 4) модель сервера приложений.

Модель удаленного управления данными и модель файлового сервера работают с пассивным сервером, большинство операций возлагается на клиента, что приводит к высокому сетевому трафику, узким спектром операций манипулирования с данными, отсутствию адекватных средств безопасности доступа к данным, дублированию кода приложений на всех клиентах.

Модель сервера баз данных работает с активным сервером. В этой модели бизнес-логика распределена между клиентом и сервером. Достоинствами данной архитектуры являются: трафик обмена информацией между клиентом и сервером резко уменьшается, осуществляется централизованный контроль с использованием механизма триггеров, сервер является активным, т. к. может инициировать обработку

данных, используя механизм триггеров, уменьшается дублирование алгоритмов обработки данных в разных клиентских приложениях. Недостатком модели является перегруженность сервера, что при выходе сервера из строя приведет к выходу из строя системы в целом. Также перегрузка сервера приводит к снижению скорости обработки запросов.

В трехуровневую модель вводится дополнительный промежуточный уровень между клиентом и сервером. Промежуточный уровень содержит один или несколько серверов приложений, компоненты приложения делятся между тремя исполнителями. Достоинствами модели являются: снижение нагрузки на трафик; уменьшение нагрузки на сервер базы данных; отсутствие необоснованного дублирования кода приложений; отсеивание «неуполномоченных» запросов до их поступления на сервер базы данных; клиентские приложения не зависят от конкретной СУБД, что увеличивает переносимость системы и ее масштабируемость.

Проанализировав достоинства и недостатки перечисленных моделей для реализации РБД промышленного предприятия, выбрана модель с использованием сервера приложений (трехуровневая архитектура распределенной системы) [3]. На **Рис.1** приведен фрагмент ER-диаграммы рассматриваемого завода.

Трехуровневая модель позволяет распределить функции РБД на три уровня, для оптимизации использования потенциала системы. Весь набор функций можно разделить на 5 групп [3]: 1) функции ввода и отображения данных; 2) прикладные функции, определяющие основные алгоритмы решения задач приложения (бизнес-логика); 3) функции обработки данных внутри приложения; 4) функции управления информационными ресурсами базы данных; 5) служебные функции, играющие связующую роль между функциями первых четырех групп.

Для применения выбранной архитектуры при построении РПД завода необходимо исследовать следующие характеристики:

- оптимальное количество серверов приложений;
- гарантированную обработку запросов;
- дополнительную задержку на сервере приложений.

Применяя используемые при расчете в системах массового обслуживания формулы, было вычислено, что для потока заявок, поступающих в отдел снабжения завода достаточно одного сервера [4,5]. Для оценки других параметров необходимо построить имитационную модель трехуровневой архитектуры и провести ряд экспериментов, изменяя интенсивность входного потока заявок.

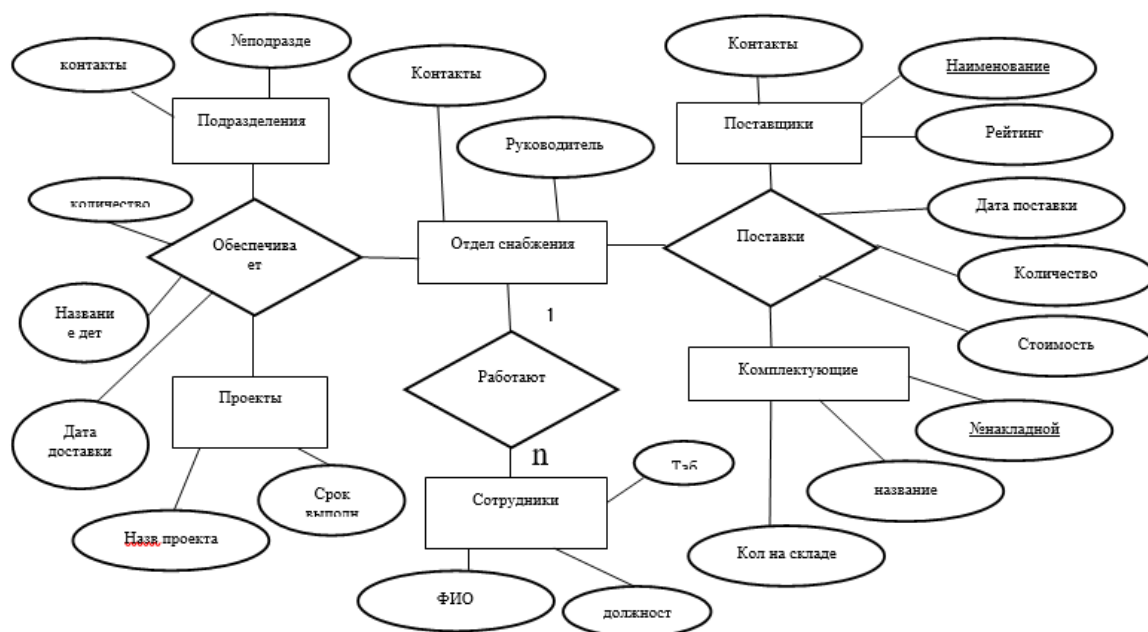


Рис.1 – Фрагмент ER-диаграммы базы данных завода

Для построения имитационной модели был выбран язык моделирования anylogic-ple-8.6.0.x86_64. Используя основные блоки из инструментария AnyLogic [6,7] была построена имитационная модель обслуживания запросов, поступающих к базе отдела снабжения завода. AnyLogic интерпретирует создаваемые графически классы активных объектов в классы Java. Схема построенной имитационной модели представлена на **Рис.2**.

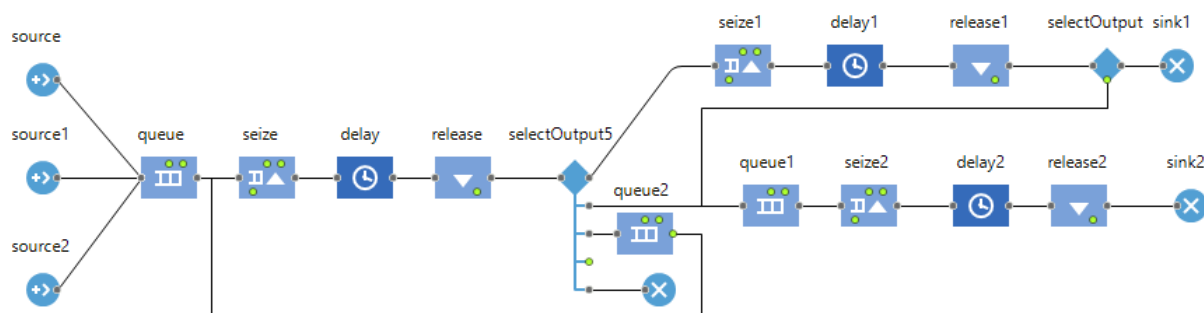


Рис.2 – Схема имитационной модели

Для сбора статистики был проведен ряд экспериментов. Будем считать, что запросы поступают на вход модели случайным образом и распределены по экспоненциальному закону [5]. Интенсивность

поступления запросов может меняться. При проведении экспериментов возьмем интервал изменения интенсивности от 0,5 до 1,6 заявок в секунду. Данные выбираются из оценки поступления реальных заявок. Полагаем, что на промежуточном уровне используется сервер приложений, со средним временем обработки 1 запрос в минуту. Проверим готовность сервера приложений к обработке такого потока заявок. При поступлении заявки в систему сначала проводится ее идентификация, проверяется права доступа к РБД, корректность и т.д. Далее, если запрос проверен и достоверен, то поступает на дальнейшую обработку на сервер приложений, иначе удаляется из системы. Затем проверяется корректность полученного результата обработки заявки, если обработка неуспешная, то заявка удаляется из системы, иначе – направляется на сервер базы данных. Заявка обрабатывается на сервере базы данных, со средним временем обработки запроса - 6 мин. Проведены эксперименты при изменении интенсивности в указанном диапазоне в течение 500 мин. каждый.

При проведении экспериментов изменялась интенсивности поступления запросов. Рассчитывая характеристики системы, сделаем некоторые допущения: не будем учитывать время обработки запросов на сервере базы данных и время ожидания в очередях к серверу базы данных. Допущения обоснованы, т.к. нас интересуют характеристики промежуточного уровня.

Рассчитаем среднюю загрузку системы [4]: $p = (\lambda T_{об}) / K$, где λ – интенсивность поступления запросов, $T_{об}$ – время обработки запроса на сервере приложений, K – количество серверов приложений. Дальше приняты дополнительные исходные данные.

$p = 1,76$ запросов/мин.

Средняя длина очереди $L = 0,5$.

Среднее число запросов в системе $M = L + pK$, $M = 2,26$.

Время ожидания $T_{ож} = L / \lambda$, $T_{ож} = 0,625$ мин.

Среднее время пребывания запроса в системе $T_{пр} = T_{обс} + T_{ожид}$, где $T_{обс}$ – среднее время обслуживания запроса на сервере приложений, $T_{ожид}$ – среднее время ожидания в очередях системы. $T_{пр} = 2,825$ мин.

Таким образом, задержка запроса на промежуточном уровне составляет 2,825 мин, что вполне удовлетворительно для задач, решаемых базой данных для отдела снабжения завода.

На **Рис.3** представлены зависимости длины очередей от интенсивности поступления запросов. На рисунке 4 представлены зависимости загрузки обрабатывающих устройств от интенсивности поступления запросов.

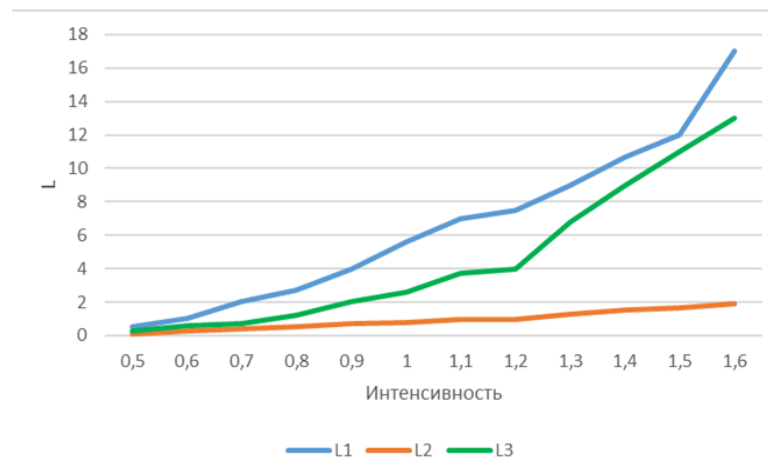


Рис.3 – Зависимости длины очереди L от интенсивности поступления запросов

Проведенный анализ показал, что при интенсивности, не превышающей 1,4, система, включающая один сервер приложений и один сервер базы данных, работает в нормальном, стационарном режиме. Увеличение интенсивности до 1,5 и выше приводит к невозможности стационарного режима: загрузка серверов приложений резко возрастает, длины очередей к этим серверам также увеличиваются. Сервер базы данных меняет загрузку незначительно, это обусловлено тем, что увеличивается время ожидания заявок в очереди к нему. Если интенсивность увеличить до 2, то система не может обработать поступающие запросы.

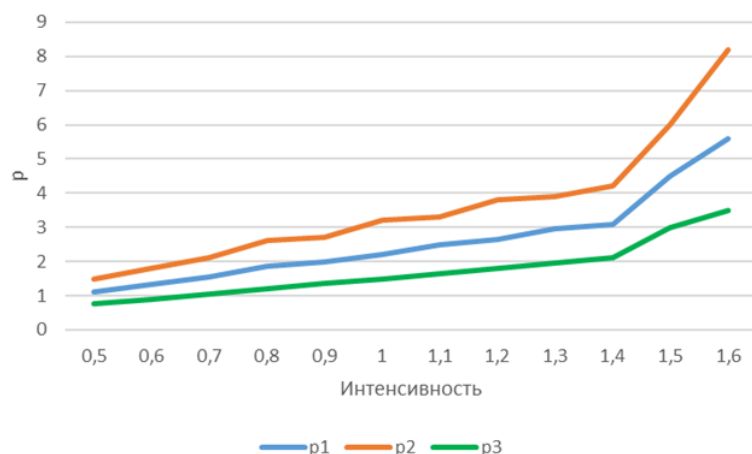


Рис.4 – Зависимости загрузки p от интенсивности поступления запросов

Приведено описание имитационной модели трехуровневой архитектуры организации, которая отражает взаимодействия клиентов и распределенной базы данных завода. В качестве клиентов рассматриваются лица, заинтересованные в получении информации из базы данных завода. Это могут быть поставщики, заказчики, сотрудники завода, отвечающие за снабжение, руководство завода и т.д. На основе построенной модели исследованы её характеристики. По результатам анализа можно сделать следующие выводы: при интенсивности поступления запросов, не превышающей 1,4, для обеспечения стационарного режима работы и гарантированного обслуживания запросов достаточно одного сервера приложений. При этом среднее время ожидания не превышает 0,625 мин, общее время задержки запроса на промежуточном сервере составляет 2,825 мин. Эти показатели удовлетворительны и подтверждаются изученной статистикой обращений клиентов к РБД завода.

Возрастание интенсивности поступления запросов от 1,5 и выше, приводит к нарушению стационарного режима работы, невозможности обслуживания поступающих заявок и, как следствие, к нарушению нормального функционирования отдела снабжения. Выходом в таком случае является масштабирование системы: необходимо увеличить количество серверов приложений и, возможно, понадобится дополнительный сервер базы данных.

Таким образом показано, что использование трехуровневой архитектуры разгружает сервер базы данных, ускоряет обработку запросов к РБД, не вызывает неоправданной задержки запросов на предварительном уровне. Использование серверов приложений позволяет повысить надежность работы системы и обеспечить гарантированную обработку запроса. Проведенное исследование показало, что РБД полностью обеспечивает все поступающие запросы от клиентов отдела снабжения рассматриваемого завода.

Библиографический список

1. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных / К.Дж. Дейт. – М.: Вильямс, 2001. – 1072 с.
2. Кузнецов С.Д. Основы баз данных / С.Д. Кузнецов. – 2-е изд., испр. – М.: Интернет – Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 484 с.
3. Шаталова Ю.Г. Моделирование процесса обработки запросов к распределенной базе данных с использованием сети Петри-Маркова

-
- / Ю.Г. Шаталова // Вестник СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. – Севастополь. – 2012. – Вып. 131. – С. 67 – 72.
4. Бутов А.А. Модель сопровождения информационной системы в терминах систем массового обслуживания / А.А. Бутов, И.А. Максимов // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии. – 2023. – № 1. – С. 6-12.
5. Мандзо Р. Экспоненциальная система массового обслуживания с отрицательными заявками и бункером для вытесненных заявок / Р. Мандзо, Н. Касконе, Р.В. Разумчик // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 9. – С. 103-113.
6. Мезенцев К.Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1: учеб. пособие. Ч. 2. / К.Н. Мезенцев. – М., 2011. –108 с.
7. Сергеев Е. С. Имитационное моделирование в системе ANYLOGIC / Е.С. Сергеев // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 3(3). – С. 109-111.

Bibliograficheskij spisok

1. Dejt K.Dzh. Vvedenie v sistemy baz dannyh / K.Dzh. Dejt. – М.: Vil'yams, 2001.– 1072 s.
2. Kuznecov S.D. Osnovy baz dannyh / S.D. Kuznecov. – 2-e izd., ispr. – М.: Internet – Universitet Informacionnyh Tekhnologij; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007. – 484 s.
3. SHatalova YU.G. Modelirovanie processa obrabotki zaprosov k raspredelennoj baze dannyh s ispol'zovaniem seti Petri-Markova / YU.G. SHatalova // Vestnik SevGTU. Ser. Informatika, elektronika, svyaz': sb. nauch. tr. – Sevastopol'. – 2012. – Vyp. 131. – S. 67 – 72.
4. Butov A.A. Model' soprovozhdeniya informacionnoj sistemy v terminah sistem massovogo obsluzhivaniya / A.A. Butov, I.A. Maksimov // Uchenye zapiski UlGU. Seriya: Matematika i informacionnye tekhnologii. – 2023. – № 1. – S. 6-12.
5. Mandzo R. Eksponencial'naya sistema massovogo obsluzhivaniya s otricatel'nymi zayavkami i bunkerom dlya vytesnennyh zayavok / R. Mandzo, N. Kaskone, R.V. Razumchik // Avtomatika i telemekhanika. – 2008. – № 9. – S. 103-113.
6. Mezencev K.N. Modelirovanie sistem v srede AnyLogic 6.4.1: ucheb. posobie. CH. 2. / K.N. Mezencev. – М., 2011. –108 с.
7. Sergeev E. S. Imitacionnoe modelirovanie v sisteme ANYLOGIC / E.S. Sergeev // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologij. – 2017. – № 3(3). – S. 109-111.

¹Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, доцент, *zamoryonoff@gmail.com*, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Шаталова Юлия Георгиевна, к.т.н., доцент, заместитель директора института информационных технологий, *bastion2417@mail.ru*, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

*MODELING THE PROCESSING PROCESS OF APPLICATIONS FOR
DISTRIBUTED DATABASE OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE*

M.V. Zamoryonov, J.G. Shatalova

The models for organizing interaction between clients and the plant's distributed database are analyzed. The choice of a three-level model is justified. The simulation model of the selected architecture is built using the Anylogic-ple-8.6.0.x86_64 modeling language. The constructed model is analyzed. Possible options for improving the model in the case of possible failures when the intensity of the flow of applications increases are proposed.

Keywords: distributed database, application server, AnyLogic toolkit

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

*Shatalova Julia Georgievna, candidate of technical sciences, docent, deputy director of the Institute of Information Technologies, *bastion2417@mail.ru*, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

ОБОСНОВАНИЕ РЕВЕРСИОННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

Аннотация. Рассмотрены альтернативные пути поиска оптимальных управлений движением объекта с одной степенью свободы из исходного в конечное состояние покоя (при задании расстояния и времени движения). Выполнен поиск условного экстремума функционала-критерия с использованием множителей Лагранжа, дано решение прямой задачи вариационного исчисления, с использованием реверсионного конструирования управления (алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления – конструирование управления). На примерах показано снижение энергоемкости управления при росте степени задаваемого полинома ускорения (управления).

Ключевые слова. Вариационное исчисление, прямая и обратная задачи, оптимальное управление, снижение энергоемкости целенаправленного движения.

Введение. Решению задач оптимизации, оптимального управления посвящены классические работы [1–4] и другие. Известны постановки задач, в которых цель управления задается краевыми условиями, а критерий оптимальности фактически отражает цель оптимизации. Понятны высказанные в [4] сомнения в постановке задач оптимального управления при не достаточно обоснованном выборе критерия оптимальности. При корректной постановке задачи участвуют методы классического вариационного исчисления, принцип максимума Л.С.Понтрягина, динамическое программирование.

В классическом вариационном исчислении при поиске управлений центральной является задача Лагранжа, в которой в качестве критерия оптимальности применяется квадратичный критерий.

В ряде публикаций было показано, что удастся находить оптимальное управление без предварительного задания критерия оптимальности [5–8]. Решение полных обратных задач вариационного исчисления (от заданной функции через уравнение Эйлера поиск функционала-критерия) названо реверсионным исчислением.

Цель исследований – применение алгоритма полной обратной задачи вариационного исчисления для поиска оптимального управления движением объекта.

Основная часть

На примерах иллюстрируются три типа поиска оптимальных управлений.

1. Условный экстремум функционала. Множители Лагранжа.

Уравнение управляемого движения объекта ($m = 1$ кг) без учета сопротивления принято в виде:

$$\frac{d^2 S(t)}{dt^2} = U(t). \quad (1)$$

Задан критерий оптимальности

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (\ddot{S})^2 dt, \quad (2)$$

где T – общее время движения. С учетом краевых условий

$$S(0) = 0, \quad \dot{S}(0) = V(0) = 0; \quad S(T) = L, \quad \dot{S}(T) = V(T) = 0, \quad (3)$$

где L – общее перемещение, необходимо найти управление $U(t)$ при $J = \min$.

В вариационной задаче на условный экстремум использованы множители Лагранжа. Дополнительно введены новые обозначения переменных [3]:

$$x_1(t) = S(t), \quad \dot{x}_1(t) = x_2(t), \quad \dot{x}_2(t) = U(t). \quad (4)$$

Функционал (2) с учетом множителей Лагранжа принимает вид:

$$J = \int_0^T \left[\frac{1}{2} U^2(t) + \lambda_1(t) [x_2 - \dot{x}_1] + \lambda_2(t) [U(t) - \dot{x}_2] \right] dt. \quad (5)$$

Для функционала (5) уравнения Эйлера-Лагранжа записываются следующим образом:

$$\frac{d\lambda_1(t)}{dt} = 0, \quad \frac{d\lambda_2(t)}{dt} = -\lambda_1(t), \quad U(t) = -\lambda_2(t). \quad (6)$$

Система (6) имеет следующее решение:

$$\lambda_1(t) = C_1, \quad \lambda_2(t) = -C_1 t + C_2, \quad U(t) = C_1 t - C_2. \quad (7)$$

Дальше, интегрируя выражение для $U(t)$ дважды, получим:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{C_1 t^2}{2} - C_2 t + C_3, \quad S(t) = \frac{C_1 t^3}{6} - \frac{C_2 t^2}{2} + C_3 t + C_4. \quad (8)$$

С учетом (3) из (8) после определения констант движение описывается известными в литературе зависимостями:

$$S(t) = \frac{Lt^2(3T - 2t)}{T^3}, \quad V(t) = \frac{6Lt(T - t)}{T^3}, \quad U(t) = \frac{6L(T - 2t)}{T^3}. \quad (9)$$

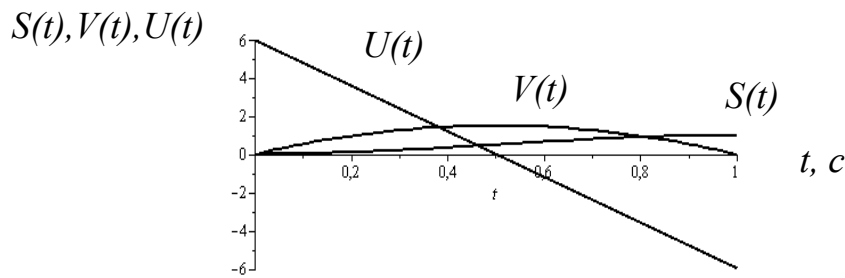


Рис.1 – Графики перемещения $S(t)$, скорости $V(t)$, ускорения $U(t)$

При $L = 1\text{ м}$, $T = 1\text{ с}$ графики перемещения, скорости и ускорения (управления) изображены на **Рис.1**.

2. Прямая задача вариационного исчисления (задача Лагранжа).

Для критерия $\int_0^T U^2 dt$ при подстановке $U = \ddot{S}$ функционалу $\int_0^T (\ddot{S})^2 dt$ соответствует уравнение Эйлера

$$\frac{d^4 S(t)}{dt^4} = 0, \quad (10)$$

решение которого

$$S(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3, \quad V(t) = \frac{dS(t)}{dt}, \quad U(t) = \frac{dV(t)}{dt}. \quad (11)$$

С учетом прежних краевых условий (3) найдены константы

$$C_3 = \frac{3L}{T^2}, \quad C_4 = -\frac{2L}{T^3}. \quad (12)$$

После их подстановки в (11) получены прежние выражения (9) для перемещения, скорости и ускорения.

3. Реверсионное конструирование управления (полная обратная задача вариационного исчисления).

Пример 1. В случае движения типа «разгон-торможение» для ускорения (управления) применимо

$$U(t) = C_1 + C_2 t. \quad (13)$$

$$\text{Тогда} \quad V(t) = \int U(t) dt + C_3, \quad S(t) = \int V(t) dt + C_4. \quad (14)$$

С учетом прежних краевых условий найдены константы и выражения для $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ совпадают с предыдущими результатами (9).

Здесь $\frac{d^2 S(t)}{dt^2} = U(t)$ – уравнение Эйлера, для которого функционал $\int_0^T U^2 dt$.

Пример 2. Пусть управление (ускорение) имеет вид:

$$U_e(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3, \quad (15)$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4 = \text{const.}$

Из дополнительных условий

$$U_e(0) = a, \quad U_e(T) = -a, \quad \int_0^{T/2} U_e(t) dt + \int_{T/2}^T U_e(t) dt = 0, \quad \frac{dU_e}{dt} \left(\frac{T}{2} \right) = 0$$

получена система алгебраических уравнений для нахождения констант.

Далее дважды интегрируя выражение (15) с учетом найденных констант и используя условие для определения параметра a $S_e(t) - L = 0$, для перемещения, скорости и ускорения (управления) получено:

$$S_e(t) = \frac{Lt^2(5T^3 - 10T^2t + 10t^2T - 4t^3)}{T^5}, \quad V_e(t) = \frac{dS_e(t)}{dt}, \quad U_e(t) = \frac{dV_e(t)}{dt}. \quad (16)$$

Графики функций (16) изображены на **Рис.2**.

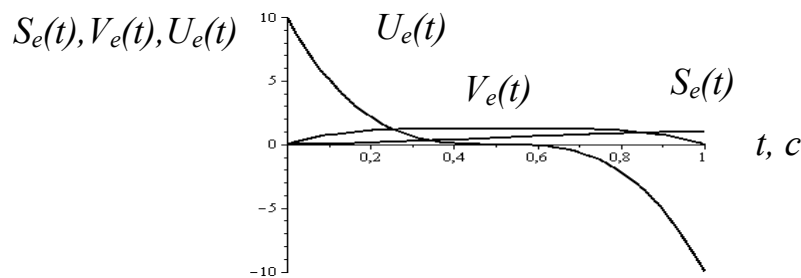


Рис. 2 – Графики перемещения $S_e(t)$, скорости $V_e(t)$, ускорения $U_e(t)$

Пример 3. Если принять $U_e(t) = \sum_{i=1}^7 C_i t^{i-1}$, то с учетом новых дополнительных новых условий

$$U_e(T/2) = 0, \quad \dot{U}_e(T/2) = 0, \quad \ddot{U}_e(T/2) = 0, \quad \dddot{U}_e(T/2) = 0, \quad \ddot{\ddot{U}}_e(T/2) = 0,$$

которые уменьшают избыточную энергию управления, после определения констант и факторизации полиномов, следует:

$$U_e(t) = \frac{14L(T-2t)^5}{T^7}, \quad V_e(t) = \frac{14Lt(T-t)(4t^2-2T+T^2)(4t^2-6Tt+3T^2)}{3T^7}, \quad (17)$$

$$S_e(t) = \frac{Lt^2(21T^5 - 70T^4t + 140T^3t^2 - 168T^2t^3 + 112Tt^4 - 32t^5)}{3T^7}.$$

Графики функций (17) изображены на **Рис.3**.



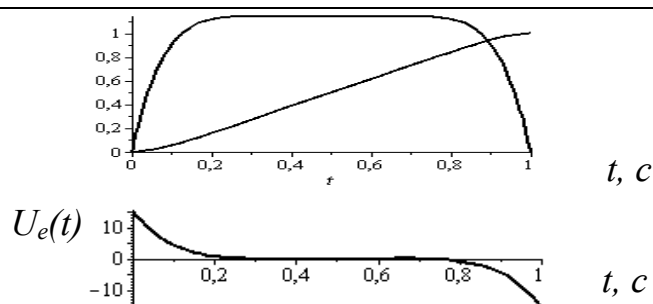


Рис.3 – Графики функций (17)

Энергия $A = 2 \int_0^{T/2} UV dt$ для классического примера $A = \frac{2,25L^2}{T^2}$, а в данном примере $A = \frac{1,3611L^2}{T^2}$, т.е. она уменьшается на 39,5%.

Выводы.

1. Реверсионное конструирование управлений типа «разгон-торможение» приводит к существенной экономии энергии для реализации оптимального движения из исходного в конечное состояние покоя (при заданном времени движения и расстоянии).

2. Фактически при росте степени полинома ускорения (или перемещения) оптимальное управление находится без предварительно задания критерия, который в данном случае является только конечным результатом реверсионного конструирования, но появляющийся критерий при большой степени полинома ускорения не имеет убедительной физической интерпретации.

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. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
4. Теория автоматического регулирования. Ч.II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с.
5. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А.И. Бохонский. – Glivice: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
6. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности

-
- / А.И. Бохонский. – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
7. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С.-Пб: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
8. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021.–170 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Pontryagin L.S. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov / L.S. Pontryagin, B.G. Boltyanskij, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko. – М.: Nauka, 1969. – 384 s.
2. Krasovsky N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem / N.N. Krasovsky. – М.: Nauka, 1968. – 476 s.
3. Sejdzh E.P. Optimal'noe upravlenie sistemami / E.P. Sejdzh, CH.S. Uajt. – М.: Radio i svyaz', 1982. – 392 s.
4. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. P.II. Teoriya nelinejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. A.A. Voronova. – М.: Gosizdat, 1955. – 248 s.
5. Bokhonsky A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischisleniya / A.I. Bokhonsky. – Glivice: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
6. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – М: Vuzovskij учебник: INFRA-M, 2016. – 174 s.
7. Bokhonsky A.I. Konstruirovaniye optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – S.-Pb: NIC MS, 2020.– 120 s.
8. Bokhonsky A.I. Mekhanika upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – М.: INFRA-M, 2021. –170s.

¹*Бохонский Александр Иванович, д.т.н., профессор, профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Варминская Наталья Ивановна, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова*

JUSTIFICATION OF REVERSIVE DESIGNING OF OPTIMAL OBJECT

MOVEMENT CONTROL

A.I. Bokhonsky, N.I. Varinskaya

The ways of searching for movement optimal controls of an object with one degree of freedom from the initial to the final state of quiescence when specifying the distance and time of movement are considered: searching for the conditional extremum of the functional criterion using Lagrange multipliers; solving a direct problem in the calculus of variations; reversible control design (using an algorithm for solving the complete inverse problem of the calculus of variations). The examples show a decrease in the energy intensity of control with an increase in the degree of the specified acceleration (control) polynomial.

Keywords: calculus of variations, direct and inverse problems, optimal control, reducing the energy intensity of targeted motion.

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, docent, head of the department, nvarinska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙНА ЭРМИТА

Карлусов В.Ю.

Аннотация. В статье излагается алгоритм вычисления двумерного преобразования Фурье. Вычислительный алгоритм основан на замене ядра интеграла его аппроксимацией, построенной на прямоугольной сетке с фиксированными шагами по осям абсцисс и ординат. В качестве аппроксимирующего полинома использован сплайн Эрмита. В статье выведены аналитические выражения, позволяющие найти двойной интеграл численно, с заранее заданной точностью, которая позволяет найти необходимые шаги сетки аппроксимации. Приводятся результаты расчётов, иллюстрирующие работу алгоритма. Разработанный алгоритм будет полезен при нахождении двумерного преобразования Фурье в отсутствие возможности получения решения аналитически.

Ключевые слова. Преобразование Фурье, численное интегрирование, аппроксимация функции сплайнами, сплайн Эрмита

Постановка задачи.

При решении ряда прикладных задач часто возникает потребность в нахождении двумерного преобразования Фурье [1–3]. В частности, в системе оптического контроля качества изготовления деталей, используются методы, основанные на базе интерферометрии. Для настройки оборудования и апробации алгоритмов измерения, применяется представление (аппроксимация) интерферограммы в виде аналитических сигналов, на основании которых, используя двумерное преобразование Фурье, получают фазовую компоненту [1]. Таким образом, ставится задача вычисления двумерного преобразования Фурье по интерферограмме, описываемой аналитическими функциями с приемлемой точностью.

Пусть оператор преобразования имеет классический вид:

$$G(u, v) = \iint_R g(x, y) e^{j(ux+vy)} dx dy, \quad (1)$$

где $g(x, y)$ – аналитически задаваемая функция, R – заданная двумерная область, которая может быть как конечной, так и бесконечной.

Определение $G(u, v)$ путём выполнения аналитических преобразований не всегда представляется возможным вследствие особенностей функции $g(x, y)$. Общей стратегией, в этом случае, представляется подход, направленный на преобразование ядра интеграла в

форму, сложность вычисления компонентов которой будет существенно ниже, нежели (1) непосредственно.

Метод решения.

Для выполнения преобразований (1) воспользуемся известным выражением показательной функции через тригонометрические функции

$$e^{j(ux+vy)} = \cos(ux+vy) + j\sin(ux+vy)$$

и представлением косинусов и синусов сумм аргументов внутри этих функций:

$$e^{j(ux+vy)} = \cos(ux)\cos(vy) - \sin(ux)\sin(vy) + j[\sin(ux)\cos(vy) + \cos(ux)\sin(vy)]. \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) приведёт к тому, что исходный интеграл окажется представленным в виде суммы интегралов:

$$G(u,v) = I^{cc}(u,v) - I^{ss}(u,v) + j[I^{sc}(u,v) + I^{cs}(u,v)], \quad (3)$$

Индексы интегралов в выражении (3) указывают на наличие в их ядре соответствующих гармонических функций в качестве множителей, а сами компоненты суммы (3) имеют вид:

$$I^{cc}(u,v) = \iint_R g(x,y) \cos(ux) \cos(vy) dx dy, \quad (4, а)$$

$$I^{ss}(u,v) = \iint_R g(x,y) \sin(ux) \sin(vy) dx dy, \quad (4, б)$$

$$I^{sc}(u,v) = \iint_R g(x,y) \sin(ux) \cos(vy) dx dy, \quad (4, в)$$

$$I^{cs}(u,v) = \iint_R g(x,y) \cos(ux) \sin(vy) dx dy. \quad (4, г)$$

Интегралы (4, а) – (4, г) подлежат численному вычислению. Выполним аппроксимацию ядра интегралов на прямоугольной сетке с фиксированными размерами ячейки, как это показано на рисунке 1.

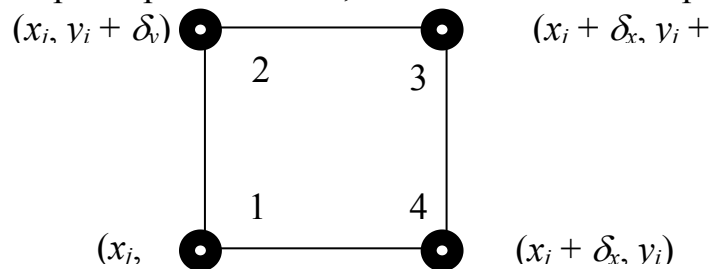


Рис.1 – Ячейка сетки аппроксимации $g(x,y)$

Пусть область интегрирования R может быть разбита на ячейки размера $\delta_x \times \delta_y$, где $\delta_r, r = \{x, y\}$ – приращение по соответствующей координате. Сама ячейка имеет прямоугольную форму и координаты (i, j) .

Допустим, что преобразуемая функция $g(x,y)$ всюду определена на ячейке и имеет частные и смешанные производные по переменным x и y .

Тогда вершинам 1 – 4, показанным на рисунке 1, можно поставить в соответствие следующие значения этих функций.

1. Для функции-оригинала $g(x,y)$:

$$\alpha_1 = g(x_j, y_i), \alpha_2 = g(x_j, y_i + \delta_y), \alpha_3 = g(x_j + \delta_x, y_i + \delta_y), \alpha_4 = g(x_j + \delta_x, y_i). \quad (5)$$

2. Для обобщённого (нормированного по δ_x) градиента функции $g(x,y)$ для переменной x :

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \delta_x \frac{\partial g(x,y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i}}, & \beta_2 &= \delta_x \frac{\partial g(x,y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i + \delta_y}}, \\ \beta_3 &= \delta_x \frac{\partial g(x,y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i + \delta_y}}, & \beta_4 &= \delta_x \frac{\partial g(x,y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3. Для обобщённого (нормированного по δ_y) градиента функции $g(x,y)$ для переменной y :

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i}}, & \gamma_2 &= \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i + \delta_y}}, \\ \gamma_3 &= \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i + \delta_y}}, & \gamma_4 &= \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

4. Для обобщённого (нормированного по δ_x и δ_y) градиента функции $g(x,y)$ для переменных x и y :

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \delta_x \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial x \partial y} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i}}, & \lambda_2 &= \delta_x \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial x \partial y} \Big|_{\substack{x=x_j \\ y=y_i + \delta_y}}, \\ \lambda_3 &= \delta_x \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial x \partial y} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i + \delta_y}}, & \lambda_4 &= \delta_x \delta_y \frac{\partial g(x,y)}{\partial x \partial y} \Big|_{\substack{x=x_j + \delta_x \\ y=y_i}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, каждой ячейке сетки будет соответствовать набор из 16-и значений: $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r, \lambda_r, r = \{1, 2, 3, 4\}$.

Выполним аппроксимацию подынтегральной функции $g(x,y)$ на заданной ячейке (i, j) двумерным полиномом третьего порядка по каждой переменной, являющейся двумерным обобщением сплайна Эрмита вида [4]:

$$p(x, y)|_{(i,j)} = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 h_{k,l} \frac{(x-x_j)^k (y-y_i)^l}{\delta_x^k \delta_y^l} = \bar{\mathbf{y}}_i^T H \bar{\mathbf{x}}_j, \quad (9)$$

где H – матрица коэффициентов полинома размером 4×4 , а векторы-столбцы определяются так

$$\bar{\mathbf{x}}_j = \begin{pmatrix} 1 \\ (x-x_j)/\delta_x \\ [(x-x_j)/\delta_x]^2 \\ [(x-x_j)/\delta_x]^3 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{y}}_i = \begin{pmatrix} 1 \\ (y-y_i)/\delta_y \\ [(y-y_i)/\delta_y]^2 \\ [(y-y_i)/\delta_y]^3 \end{pmatrix}.$$

Для обеспечения качественной аппроксимации, значения аппроксимирующего полинома (9) в углах ячейки должны совпадать со значениями, определяемыми функцией $g(x,y)$ в выражениях (5) – (8). В результате имеем систему линейных уравнений, в ходе решения которой получим набор аппроксимирующих коэффициентов, задаваемых матрицей H , по каждой из заданных ячеек (i, j) на сетке. Найденное решение будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} h_{00} &= \alpha_1, h_{01} = \gamma_1, h_{02} = 3(\alpha_2 - \alpha_1) - 2\gamma_1 - \gamma_2, h_{03} = 2(\alpha_1 - \alpha_2) + \gamma_1 + \gamma_2, \\ h_{10} &= \beta_1, h_{11} = \lambda_1, h_{12} = 3(\beta_2 - \beta_1) - 2\lambda_1 - \lambda_2, h_{13} = 2(\beta_1 - \beta_2) + \lambda_1 + \lambda_2, \\ h_{20} &= 3(\alpha_4 - \alpha_1) - 2\beta_1 - \beta_4, h_{21} = 3(\gamma_4 - \gamma_1) - 2\lambda_1 - \lambda_4, \\ h_{22} &= 9(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4) + 6(\beta_1 - \beta_2 + \gamma_1 - \gamma_4) + \\ &\quad + 3(\beta_4 - \beta_3) + 3(\gamma_2 - \gamma_3) + 4\lambda_1 + 2(\lambda_2 + \lambda_4) + \lambda_3, \\ h_{23} &= 6(-\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4) + 4(\beta_2 - \beta_1) + 2(\beta_3 - \beta_4) - \\ &\quad - 3(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) - 2(\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_3 - \lambda_4, \\ h_{30} &= 2(\alpha_1 - \alpha_4) + \beta_1 + \beta_4, h_{31} = 2(\gamma_1 - \gamma_4) + \lambda_1 + \lambda_4, \\ h_{32} &= 6(-\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4) + 3(-\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_4) + \\ &\quad + 4(\gamma_4 - \gamma_1) + 2(\gamma_3 - \gamma_2) - 2(\lambda_1 + \lambda_4) - \lambda_2 - \lambda_3, \\ h_{33} &= 4(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4) + 2(\beta_1 - \beta_2 - \beta_3 + \beta_4) + \\ &\quad + 2(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Очевидно, что интерполирующий сплайн (9) будет отличаться от функции $g(x,y)$ и её частных производных внутри заданной ячейки. Представляется возможным выполнить оценку указанного отличия в точке пересечения диагоналей ячейки, то есть при значениях координат $x = x_j + \delta_x/2$ и $y = y_i + \delta_y/2$.

Для интерполируемой функции эти значения определяются как:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= g(x_j + \delta_x/2, y_i + \delta_y/2), & \beta_0 &= \delta_x \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \bigg|_{\substack{x_j + \delta_x/2 \\ y_i + \delta_y/2}}, \\ \gamma_0 &= \delta_y \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \bigg|_{\substack{x_j + \delta_x/2 \\ y_i + \delta_y/2}}, & \lambda_0 &= \delta_x \delta_y \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \bigg|_{\substack{x_j + \delta_x/2 \\ y_i + \delta_y/2}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Аналогичным образом можно найти эти же величины и в случае использования аппроксимирующего полинома. В результате вычислений получаются выражения:

$$\begin{aligned} \alpha_0(p) &= \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4} + \frac{\beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \beta_4 + \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 + \gamma_4}{16} + \\ &\quad + \frac{\lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4}{64}, \\ \beta_0(p) &= \frac{3(\alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_1 - \alpha_2)}{4} - \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4}{8} - \frac{\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_4}{16} - \\ &\quad - \frac{\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_4}{32}, \\ \gamma_0(p) &= \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_3 - \alpha_4)}{4} + \frac{3(\beta_2 - \beta_1 - \beta_3 + \beta_4)}{16} - \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4}{8} - \\ &\quad - \frac{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4}{32}, \\ \lambda_0(p) &= \frac{9(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4)}{4} + \frac{\beta_1 - \beta_2 - \beta_3 + \beta_4 + 3(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4)}{8} + \\ &\quad + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4}{16}. \end{aligned}$$

Абсолютные ошибки аппроксимации можно найти как модуль разности соответствующих компонент полученных выражений и (11). Они равны

$$\varepsilon_\alpha = |\alpha_0(p) - \alpha_0|, \quad \varepsilon_\beta = |\beta_0(p) - \beta_0|, \quad \varepsilon_\gamma = |\gamma_0(p) - \gamma_0|, \quad \varepsilon_\lambda = |\lambda_0(p) - \lambda_0|. \quad (12)$$

Величины (12) показывают, насколько отличаются аппроксимируемая функция $g(x, y)$ от аппроксимирующего полинома $p(x, y)$, и являются мерой точности проведённой аппроксимации. На основании их значений могут приниматься решения об изменении в стороны увеличения или уменьшения размеров ячейки сетки аппроксимации δ_x , δ_y или обоих одновременно.

При зафиксированных значениях δ_x и δ_y , и, принимая допущение считать область R прямоугольной, нахождение интегралов (4) сведётся к

вычислению двойных сумм на сетке аппроксимации. В частности, интеграл (4,а) предстанет в виде:

$$I^{cc}(u, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \int_{x_j}^{x_j + \delta_x} \int_{y_i}^{y_i + \delta_y} g(x, y) \cos(ux) \cos(vy) dx dy, \quad (13)$$

где M – число разбиений области R с шагом δ_x по горизонтали, а N – число разбиений области с шагом δ_y по вертикали.

В последнем выражении проведём замену функции $g(x, y)$ аппроксимирующим полиномом (9), в привязке к ячейкам с координатами (i, j)

$$I_{i,j}^{cc}(u, v) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 h_{k,l}^{i,j} \varphi_k^{cj}(u) \varphi_l^{ci}(v), \quad (14)$$

где символом φ обозначены интегралы

$$\varphi_k^{cj}(u) = \delta_x^{-k} \int_{x_j}^{x_j + \delta_x} (x - x_j)^k \cos(ux) dx, \quad (15)$$

$$\varphi_l^{ci}(v) = \delta_y^{-l} \int_{y_i}^{y_i + \delta_y} (y - y_i)^l \cos(vy) dy. \quad (16)$$

Само преобразование (13), с учётом выражений (14) – (15), может быть рассчитано по алгоритму

$$I^{cc}(u, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{j,j}^{cc}(u, v). \quad (17)$$

Интегралы (15) и (16) берутся аналитически, а результаты вычислений приводятся в [5] и выглядят так:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k^{cj}(u) &= (-1)^k \left[\mu_k(\theta_x) \cos(ux_j) - \eta_k(\theta_x) \sin(ux_j) \right] \delta_x \\ \varphi_l^{ci}(v) &= (-1)^l \left[\mu_l(\theta_y) \cos(vy_i) - \eta_l(\theta_y) \sin(vy_i) \right] \delta_y \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

В выражении (18) введены обозначения, соответствующие безразмерным переменным: $\theta_x = u\delta_x$ и $\theta_y = v\delta_y$, а функции $\mu_r(\theta)$ и $\eta_r(\theta)$ определяются, аналогично одноимённым [6]:

$$\left. \begin{aligned} \mu_0(\theta) &= \frac{\sin \theta}{\theta}, & \mu_1(\theta) &= \frac{1 - \cos \theta - \theta \sin \theta}{\theta^2}, \\ \mu_2(\theta) &= \frac{2\theta \cos \theta - (2 - \theta^2) \sin \theta}{\theta^3}, & \mu_3(\theta) &= \frac{3(2 - \theta^2) \cos \theta + \theta(6 - \theta^2) \sin \theta - 6}{\theta^4}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_0(\theta) &= \frac{1 - \cos \theta}{\theta}, & \eta_1(\theta) &= \frac{\theta \cos \theta - \sin \theta}{\theta^2}, \\ \eta_2(\theta) &= \frac{(2 - \theta^2) \cos \theta + 2\theta \sin \theta - 2}{\theta^3}, & \eta_3(\theta) &= \frac{3(2 - \theta^2) \sin \theta + \theta(6 - \theta^2) \cos \theta}{\theta^4}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В формулах (19) и (20) при значении переменной θ , равном нулю, возникают неопределённости вида “нуль, делённый на нуль”. Их раскрытие приводит к результату:

$$\left. \begin{aligned} \mu_0(0) &= 1, & \mu_1(0) &= -\frac{1}{2}, \\ \mu_2(0) &= \frac{1}{3}, & \mu_3(0) &= -\frac{1}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_0(0) &= 0, & \eta_1(0) &= 0, \\ \eta_2(0) &= 0, & \eta_3(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Применительно к интегралам (4, б – г), аналогичные рассуждения дадут следующие выражения для их численного нахождения

$$I^{ss}(u, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j}^{ss}(u, v), \quad (23)$$

$$I^{sc}(u, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j}^{sc}(u, v), \quad (24)$$

$$I^{cs}(u, v) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j}^{cs}(u, v). \quad (25)$$

В выражениях (23) – (25) под знаками двойных сумм обозначены, в свою очередь, суммы интегралов по ячейкам сетки аппроксимации:

$$I_{i,j}^{ss}(u, v) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 h_{k,l}^{i,j} \varphi_k^{sj}(u) \varphi_l^{si}(v), \quad (25)$$

$$I_{i,j}^{sc}(u, v) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 h_{k,l}^{i,j} \varphi_k^{sj}(u) \varphi_l^{ci}(v), \quad (26)$$

$$I_{i,j}^{cs}(u, v) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 h_{k,l}^{i,j} \varphi_k^{cj}(u) \varphi_l^{si}(v). \quad (27)$$

Интегралы под знаками суммы, обозначенные выше как $\varphi_k^{cj}(u)$ и $\varphi_l^{ci}(v)$, могут быть вычислены по формулам (18) – (22), другие же, имеющие вид

$$\varphi_k^{sj}(u) = \delta_x^{-k} \int_{x_j}^{x_j + \delta_x} (x - x_j)^k \sin(ux) dx ,$$

$$\varphi_l^{si}(v) = \delta_y^{-l} \int_{y_i}^{y_i + \delta_y} (y - y_i)^l \sin(vy) dy ,$$

после интегрирования дадут расчётные формулы, соответственно

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k^{sj}(u) &= (-1)^k \left[\mu_k(\theta_x) \cos(ux_j) + \eta_k(\theta_x) \sin(ux_j) \right] \delta_x \\ \varphi_l^{si}(v) &= (-1)^l \left[\mu_l(\theta_y) \cos(vy_i) + \eta_l(\theta_y) \sin(vy_i) \right] \delta_y \end{aligned} \right\} . \quad (29)$$

Вычислительные модели и результаты экспериментов.

Проверка работоспособности вычислительного алгоритма проводилась на тестовых функциях, двумерное преобразование Фурье для которых представляется возможным найти аналитически.

Исходя из этих соображений, при выполнении верификации алгоритма были использованы нижеследующие.

1. Плоскость, параллельная координатной плоскости единичной высоты.

2. Гармонические функции $g(x, y) = \sin(x + y)$ и $g(x, y) = \cos(x + y)$ и базисная функция преобразования Хартли $g(x, y) = \sin(x + y) + \cos(x + y)$.

3. Функция Франке (R.F. Franke), изображение которой является логотипом среды MatLab. Эта функция имеет математическое описание

$$\text{Franke}(x, y) = \frac{3}{4} \left(e^{-\frac{1}{4}[(9x-2)^2 + (9y-2)^2]} + e^{-\left[\frac{1}{49}(9x+1)^2 + \frac{1}{10}(9y+1)^2 \right]} \right) - \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{4}[(9x-7)^2 + (9y-3)^2]} - \frac{1}{5} e^{-[(9x-4)^2 + (9y-7)^2]} .$$

Расчёты проводились на квадратных, по переменным (x, y) областях интегрирования, с равными размерами ячеек аппроксимации δ_x и δ_y . Сравнение результатов вычислений с результатами, полученными аналитически, подтвердило работоспособность разработанного алгоритма. В расположенной ниже таблице сведены результаты тестирования функции-логотипа.

В 1-м столбце таблицы 1 обозначено: $\Re$ – действительная часть преобразования Фурье функции Франке, $\Im$ – мнимая часть преобразования Фурье функции Франке, $||$ – модуль преобразования Фурье функции Франке. 2-й столбец содержит значение соответствующей части преобразования, взятый по абсолютной величине.

Таблица 1. – Погрешности в расчётах, полученные для теста Франке

Функция	Модуль максимума функции	Модуль максимальной абсолютный ошибки	Относительная ошибка
(1)	(2)	(3)	(4)
$\Re \{ \text{Franke}(u,v) \}$	0.6749	0.0469	0.0695
$\Im \{ \text{Franke}(u,v) \}$	0.1786	0.0980	0.05487
$ \text{Franke}(u,v) $	0.6749	0.0056	0.0083

В 3-й столбец помещено максимальное, по абсолютной величине, отклонение расчётного и аналитически найденного значений, определённое по всем ячейкам сетке аппроксимации. 4-й столбец получен поэлементным делением содержимого 3-го столбца на содержимое второго столбца.

Иллюстрации к расчётам действительной, мнимой и модуля двумерного преобразования Фурье для функции R.F. Franke приводятся на **Рис.2**.

Вычисления, соответствующие **Рис.2**, были проведены на квадратной области $[-2,2; 2,2] \times [-2,2; 2,2]$ с размером ячейки $0,1 \times 0,1$, а частные производные находились по формуле Л. Эйлера.

Выводы.

1. Предложенный алгоритм расчётов показал себя работоспособной вычислительной процедурой. Несмотря на кажущуюся громоздкость, он, тем не менее, позволяет найти решение с приемлемой точностью за конечное число шагов.

2. Наряду с использованием в ходе интерферометрического анализа, данный алгоритм может быть использован при выполнении расчётов в ходе моделирования и анализа колебаний упругих тел (струн, тяжёлых нитей, стержней и пластин), для оценки действия объёмных сил на статические и динамические объекты, каковыми являются устройства, механизмы и составляющие их детали

3. При решении практических задач математики и механики, в случае, когда аналитическое решение задачи двумерного преобразования Фурье затруднено, разработанный алгоритм расчётов займёт своё место в ряду численных алгоритмов, решающих похожую проблему.

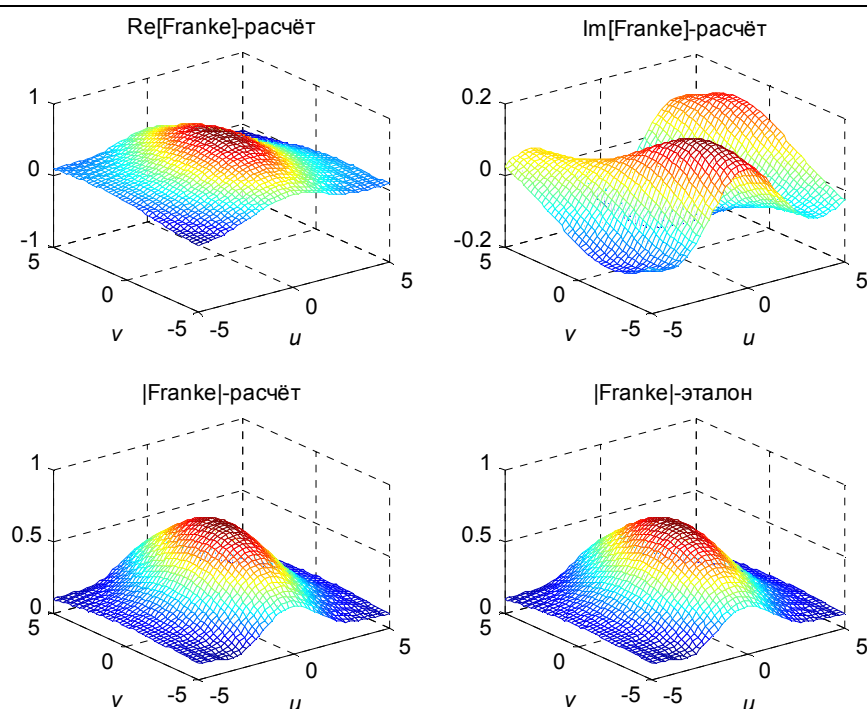


Рис.2 – Результаты вычислений для функции R.F. Franke

Библиографический список

1. Чемякин Э.В. Исследование преобразования Фурье для определения двумерного распределения статической интерференционной картины / Э.В. Чемякин, В.И. Алехнович // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2004.– Вып. № 3.– С.72–78.
2. Даджион Д. Цифровая обработка многомерных сигналов / Д. Даджион, Р. Мерсеро. – М.: Мир, 1998. – 486 с.
3. Снеддон И. Преобразования Фурье / И. Снеддон. – М.: Изд.иностр. лит-ры., 1953.– 607 с.
4. Вержбицкий В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высш.шк., 2002. – 848 с.
5. Доценко С.В. Численное преобразование Фурье, основанное на интерполяции функции кубическими сплайнами / С.В. Доценко // Вестник СевГТУ. Сер. Физика и математика. – 2005.– Вып.70.– С.134–141.
6. Доценко С.В. Численные преобразования Фурье, основанные на интерполяции функции локальными сплайнами / С.В. Доценко // Вестник СевГТУ. Сер. Физика и математика. – Вып.99.– С.142–145.

Bibliograficheskij spisok

1. СНemyakin E.V. Issledovanie preobrazovaniya Fur'e dlya opredeleniya dvumernogo raspredeleniya staticheskoy interferencionnoj kartiny

-
- / E.V. CHemyakin, V.I. Alekhnovich // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Estestvennye nauki. – 2004.– Vyp. № 3.– S.72–78.
2. Dadzhion D. Cifrovaya obrabotka mnogomernykh signalov / D. Dadzhion, R. Mersero. – M.: Mir, 1998. – 486 s.
3. Sneddon I. Preobrazovaniya Fur'e / I. Sneddon. – M.: Izd.inostr. lit-ry., 1953.– 607 s.
4. Verzhbickij V.M. Osnovy chislennykh metodov / V.M. Verzhbickij. – M.: Vyssh.shk., 2002. – 848 s.
5. Docenko S.V. CHislennoe preobrazovanie Fur'e, osnovannoe na interpolyacii funktsii kubicheskimi splajnami / S.V. Docenko // Vestnik SevGTU. Ser. Fizika i matematika. – 2005.– Vyp.70.– S.134–141.
6. Docenko S.V. CHislennyye preobrazovaniya Fur'e, osnovannyye na interpolyacii funktsii lokal'nyimi splajnami / S.V. Docenko // Vestnik SevGTU. Ser. Fizika i matematika. – Vyp.99.– S.142–145.

Карлусов Вадим Юрьевич – к.т.н., доцент, kvyu_2015@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

*AN ALGORITHM FOR CALCULATING THE TWO-DIMENSIONAL
FOURIER TRANSFORM USING THE HERMITE SPLINE*

V.Yu. Karlusov

The article describes an algorithm for calculating the two-dimensional Fourier transform. The computational algorithm is based on replacing the kernel of the integral with its approximation based on a rectangular grid with fixed steps along the axes of the abscissas and ordinates. The Hermite spline is used as an approximating polynomial. In the article, analytical expressions are derived that allow us to find the double integral numerically, with a predetermined accuracy, which allows us to find the necessary steps of the approximation grid. The results of calculations illustrating the operation of the algorithm are presented. The developed algorithm will be useful in finding a two-dimensional Fourier transform in the absence of the possibility of obtaining a solution analytically.

Key words: fourier transform, numerical integration, function approximation by splines, Hermite spline.

Karlusov Vadim Yur'evich – candidate of technical sciences, docent, kvyu_2015@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛАКТИКИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ДЕФЕКТОСКОПА

Мирзоян Н.Ю.¹, Заморёнов М.В.², Шаталова Ю.Г.³

***Аннотация.** Рассмотрена математическая модель, описывающая влияние профилактического технического обслуживания вихретокового преобразователя при вихретоковом контроле на общую надежность дефектоскопа. Представлены результаты моделирования и проведено их сравнение с результатами использования теоремы о среднестатистическом времени пребывания системы в подмножестве состояний.*

***Ключевые слова.** Неразрушающий контроль, вихретоковый метод, полумарковская система, алгоритм фазового укрупнения, функция распределения, метод путей.*

Проведение систематического профилактического технического обслуживания позволяет значительно продлить срок службы технологического оборудования [1,2,3]. Известны случаи, когда небольшие неисправности во второстепенных компонентах оборудования могли быть устранены в кратчайшие сроки, однако, привели к выходу из строя основного оборудования, что в свою очередь вызывало необходимость проведения сложных ремонтных работ. Для решения данной задачи существуют различные подходы к планированию профилактического технического обслуживания. Одним из таких подходов является календарная стратегия проведения технического обслуживания, которая предусматривает выбор оптимального времени для его осуществления на основе предварительно разработанной математической модели [4 - 9]. Такая модель позволяет учитывать производительность оборудования при проведении профилактики.

В данной статье планируется изучить процесс функционирования дефектоскопа, основанного на принципе вихретокового контроля [10], с учетом проведения календарной профилактики вихретокового преобразователя.

Вихретоковый контроль относится к одному из видов неразрушающего контроля, что значительно увеличивает область его применения в современной промышленности.

Рассмотрим функционирование такой системы. Время ее безотказной работы – СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$, время восстановления системы – СВ β_1 с ФР $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$. В случайные моменты времени (через промежутки времени α_2 с ФР $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$) проводится профилактика, время проведения которой – СВ β_2 с ФР $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$.

После проведения профилактики и восстановления работа системы начинается сначала (рабочие свойства системы полностью обновляются). СВ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ предполагаются независимыми, имеющими конечные математические ожидания и дисперсии; у ФР $F_1(t), F_2(t), G_1(t), G_2(t)$ существуют плотности $f_1(t), f_2(t), g_1(t), g_2(t)$.

Для описания функционирования системы используем ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ и соответствующий ему ПМП $\xi(t)$. Используем полумарковские состояния:

$$E = \{00, 10x, 01\},$$

где 10x – началась профилактика; время, оставшееся до окончания безотказной работы $x > 0$; 00 – профилактика завершена, работа системы началась сначала; 01 – системы отказала, началось восстановление.

Граф состояний системы приведен на **Рис.1**.

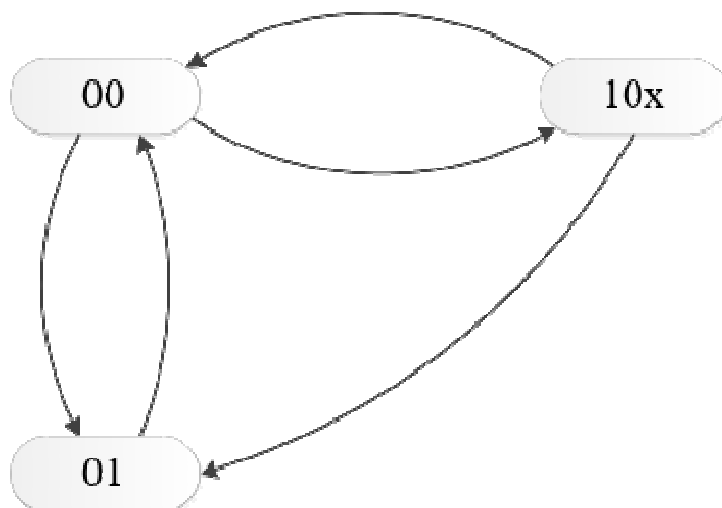


Рис.1 – Граф состояний системы

Для данной системы подмножества работоспособных E_+ и неработоспособных E_- состояний имеют вид:

$$E_+ = \{00, 10x\}, E_- = \{01\}.$$

Для достижения цели моделирования, а именно определения коэффициента готовности такой системы воспользуемся методом путей

[11]. Для этого, в первую очередь, требуется произвести укрупнение системы [12], то есть перейти от системы с непрерывным фазовым пространством состояний к системе с дискретными состояниями.

В таком случае непрерывная компонента будет равна:

$$x = [\alpha_2 - \alpha_1]^+.$$

Отсюда, функция распределения выше указанной величины по теореме Королюка В.С. [6] будет равна:

$$\bar{F}_x(t) = \frac{\int_0^{\infty} [F_2(t+x) - F_2(x)] f_1(x) dx}{\int_0^{\infty} [1 - F_2(x)] f_1(x) dx}.$$

Определим вероятности переходов системы:

$$P_{00}^{10x} = \int_0^{\infty} f_1(t) F_2(t) dt, \quad P_{00}^{01} = \int_0^{\infty} f_1(t) \bar{F}_2(t) dt, \quad P_{10x}^{00} = \int_0^{\infty} f_x(t) G_2(t) dt, \\ P_{10x}^{01} = \int_0^{\infty} f_x(t) \bar{G}_2(t) dt.$$

После определения вероятностей переходов, запишем времена пребывания системы в состояниях:

$$\theta_0 = \alpha_1 \wedge \alpha_2, \quad \theta_1 = x \wedge \beta_2, \quad \theta_2 = \beta_1$$

где $\wedge$ – знак минимума.

Найдем ФР времен пребывания системы в состояниях:

$$\bar{F}_{00}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t), \quad \bar{F}_{10x}(t) = \bar{F}_x(t) \cdot \bar{G}_2(t), \quad \bar{F}_{01}(t) = G_1(t).$$

Для получения искомых характеристик находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ):

$$\rho_{00} = \frac{P_{01}^{00}}{1 + P_{01}^{00} + P_{00}^{10x} \cdot P_{01}^{00} - P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00}}, \\ \rho_{10x} = \frac{P_{00}^{10x} \cdot P_{01}^{00}}{1 + P_{01}^{00} + P_{00}^{10x} \cdot P_{01}^{00} - P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00}}, \quad \rho_{01} = \frac{1 - P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00}}{1 + P_{01}^{00} + P_{00}^{10x} \cdot P_{01}^{00} - P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00}}$$

Для определения функций распределения времен пребывания системы в подмножествах E_+ и E_- воспользуемся методом путей [12]. Выделим все возможные пути перехода системы из множества M_+ в подмножество M_- .

$$W_1^1 = \{00, 01\}, \quad W_1^2 = \{00, 10x, 01\},$$

$$W_2^1 = \{00, 10x, 00, 01\}, W_2^2 = \{00, 10x, 00, 10x, 01\} \dots$$

Остальные пути образуются при повторном попадании системы в состояния 00 и 10x.

Найдем вероятности реализации каждого из путей:

$$P_1^1 = P_{00}^{01}, P_1^2 = P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{01}$$

$$P_2^1 = P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00} \cdot P_0^{01}, P_2^2 = P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00} \cdot P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{01}$$

...

$$P_n^1 = (P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00})^{n-1} \cdot P_{00}^{01}, P_n^2 = (P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{00})^{n-1} \cdot P_{00}^{10x} \cdot P_{10x}^{01}$$

Определим времена пребывания системы на каждом из путей:

$$F_1^1 = F_{00}(t), F_1^2 = F_{00}(t) * F_{10x}(t)$$

$$F_2^1 = F_{00}(t) * F_{10x}(t) * F_{00}(t), F_2^2 = F_{00}(t) * F_{10x}(t) * F_{00}(t) * F_{10x}(t)$$

...

$$F_n^1 = (F_{00}(t) * F_{10x}(t))^{(*)n-1} * F_{00}(t), F_n^2 = F_{00}(t)^{(*)n} * F_{10x}(t)^{(*)n}$$

Тогда функция распределения $F_+(t)$ времени пребывания системы в подмножестве E_+ имеет вид:

$$F_+(t) = P_{00}^{01} \sum_{k=1}^{\infty} (P_{00}^{10x} P_{10x}^0)^{(k-1)} F_{00}(t) * F_{00}(t)^{(*)k-1} * F_{10x}(t)^{(*)k-1} +$$

$$+ P_{00}^{10x} P_{40x}^{01} \sum_{k=1}^{\infty} (P_{00}^{10x} P_{10x}^0)^{(k-1)} F_{00}(t)^{(*)k} * F_{10x}(t)^{(*)k},$$

С использованием преобразований Лапласа осуществим переход в комплексную область:

$$F_+(s) = P_{00}^{01} \sum_{k=1}^{\infty} (P_{00}^{10x} P_{10x}^0)^{(k-1)} F_{00}(s) F_{00}(s)^{k-1} F_{10x}(s)^{k-1} +$$

$$+ P_{00}^{10x} P_{40x}^{01} \sum_{k=1}^{\infty} (P_{00}^{10x} P_{10x}^0)^{(k-1)} F_{00}(s)^k F_{10x}(s)^k.$$

Оба слагаемых представляют собой сумму двух бесконечных сходящихся рядов, которые в пределе дают следующее выражение:

$$F_+(s) = \frac{P_{00}^{01} F_{00}(s) + P_{00}^{10x} P_{40x}^{01} F_{112}(s) F_{210}(s)}{1 - P_{00}^{10x} P_{10x}^0 F_{00}(s) F_{10x}(s)}.$$

Искомую функцию распределения получаем, произведя переход из области изображений в область оригиналов.

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

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$ и $G_2(t)$; которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \gamma_1, \gamma_2$ соответственно с учетом зависимостей:

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

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

где $\lambda_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,200 \text{ ч}^{-1}$; $\mu_1 = 0,1333 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 0,400 \text{ ч}^{-1}$; $\nu_1 = 6,667 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 20,0 \text{ ч}^{-1}$; $\gamma_1 = 2,667 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 8,00 \text{ ч}^{-1}$.

На **Рис. 2** приведена искомая $F_+(t)$ функция распределения, полученная в данной работе.

Сравним значения математического ожидания полученной функции и математического ожидания, определяемого с помощью теоремы [7] о среднестационарном времени пребывания системы 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 19.2182202963 ч, тогда как, определяемое с помощью выражения (1) – 19.2182202963 ч.

Нетрудно констатировать, что математические ожидания совпадают.

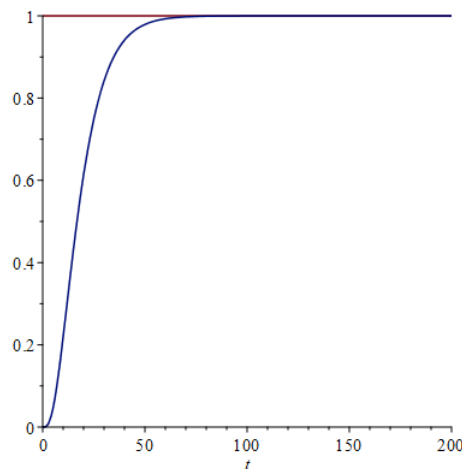


Рис.2 – Вид ФР времени пребывания системы в подмножестве E_+

Проведенное сравнение математических ожиданий времен пребывания в подмножестве работоспособных 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 полученных результатов.

В дальнейших исследованиях планируется применение метода для моделирования более сложных технического обслуживания в автоматизированном производстве, а также применение построенной модели при оптимизации времен проведения профилактик в исследуемых системах.

Библиографический список

1. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. шк., – 1982. – 231 с.
3. Глеч С.Г. Определение оптимальных моментов профилактики технологической ячейки с мгновенно пополняемым резервом времени / С.Г. Глеч // Сборник научных трудов СИЯЭиП. – 2001. – Вып.5. – с. 187 – 193.
4. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
5. Королюк В.С. Стохастические модели систем / В.С. Королюк. – Киев: Наукова думка, 1989. – 208 с.
6. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королюк // Кибернетика. – 1981. – №4. – С. 121–124.
7. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.
8. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
9. 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.
10. Мирзоян Н.Ю. Анализ влияния конструкции вихретокового преобразователя на выходные данные контроля при вихретоковом

-
- контроле / Н.Ю. Мирзоян, М.В. Заморенов, Д.А. Гета // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2023. – № 4(24). – С. 76-84.
11. Заморёнов М.В. Метод моделирования регенерирующих систем. Математическое моделирование / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова. – 2018. – Т.30.№ 6. – С. 134-144.
12. Заморёнов М.В. Моделирование процесса функционирования обслуживающего устройства с обесценивающими отказами методом путей / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова, Ю.Л. Явкун // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып.4. – С. 225-236.

Bibliograficheskij spisok

1. Bajhel't F. Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskij podhod / F. Bajhel't, P. Franken. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 392 s.
2. Barzilovich E.YU. Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnyh sistem: Ucheb. posobie dlya vuzov. / E.YU. Barzilovich. – M.: Vyssh. shk., – 1982. – 231 s.
3. Glech S.G. Opredelenie optimal'nyh momentov profilaktiki tekhnologicheskoy yachejki s mgnovenno popolnyaemym rezervom vremeni / S.G. Glech // Sbornik nauchnyh trudov SIYAEiP. – 2001. – Vyp.5. – s. 187 – 193.
4. Korolyuk V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 236 s.
5. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem / V.S. Korolyuk. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 208 s.
6. Korolyuk V.S. Superpoziciya processov markovskogo vosstanovleniya / V.S. Korolyuk // Kibernetika. – 1981. – №4. – S. 121–124.
7. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.
8. Rajnshke K. Ocenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniem grafov / K. Rajnshke, I.A. Ushakov. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 208 s.
9. Kopp V.YA Stohasticheskie modeli avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s vremennym rezervirovaniem / V.YA. Kopp, YU.E. Obzherin, A.I. Peschanskij. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2000. – 284 s.
10. Mirzoyan N.YU. Analiz vliyaniya konstrukcii vihretokovogo preobrazovatelya na vyhodnye dannye kontrolya pri vihretokovom kontrole / N.YU. Mirzoyan, M.V. Zamorenov, D.A. Geta // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2023. – № 4(24). – S. 76-84.

-
11. Zamoryonov M.V. Metod modelirovaniya regeneriruyushchih sistem. Matematicheskoe modelirovanie / M.V. Zamoryonov, V.YA. Kopp, D.V. Zamoryonova. – 2018. – Т.30.№ 6. – S. 134-144.
 12. Zamoryonov M.V. Modelirovanie processa funkcionirovaniya obsluzhivayushchego ustrojstva s obescenivayushchimi otkazami metodom putej / M.V. Zamoryonov, V.YA. Kopp, D.V. Zamoryonova, YU.L. YAvkun // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2016. – Vyp.4. – S. 225-236.

¹Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nataly2997@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

²Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Шаталова Юлия Георгиевна, к.т.н., доцент, bastion2417@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

ANALYSIS OF THE EFFECT OF AN EDDY CURRENT CONVERTER PREVENTION ON THE RELIABILITY OF THE FLAW DETECTOR

N.Y. Mirzoyan, M.V. Zamoryonov, Ju.G. Shatalova

The mathematical model describing the effect of preventive maintenance of an eddy current converter during eddy current control on the overall reliability of the flaw detector is considered. The simulation results are presented and compared with the theorem on the average residence time of the system in a subset of the states.

Keywords: non-destructive testing, eddy current method, semi-Markov system, phase enlargement algorithm, distribution function, path method.

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

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

Shatalova Julia Georgievna, candidate of technical sciences, docent, bastion2417@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 531.391.1

МЕТОД НАВЕДЕНИЯ НА ЦЕЛЬ ПОДВОДНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОСИСТЕМ

Ляшко А.Д.¹, Васильев Д.М.² Крамарь В.А.³

Аннотация. Подводные роботизированные комплексы играют важную роль в подводных исследованиях. Однако их потенциал ограничен запасом энергии бортовых аккумуляторов и емкостью хранилища данных. Эта проблема может быть решена с помощью системы подводной док-станции. Подводная стыковочная платформа может использоваться в качестве станции подзарядки подводного роботизированного комплекса и для передачи данных. В данной работе предлагается алгоритм распознавания стыковочного узла круглой формы на расстоянии до 5 метров в водной среде с помощью камеры установленной на подводном роботизированном комплексе. Экспериментальная часть проводилась в бассейне научно-исследовательской лаборатории СевГУ и в акватории Черного моря. Полученные результаты подтвердили работоспособность алгоритма.

Ключевые слова. Подводный роботизированный комплекс, подводная стыковка, распознавание подводных объектов, компьютерное зрение.

Введение. Современные подводные роботизированные комплексы (ПРК) находят все более широкое применение при проведении исследований в Мировом океане, а также при разработках труднодоступных месторождений. В настоящее время наиболее распространены традиционные экспедиции судов обеспечения с телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА) либо автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) на борту. Однако, использование судов обеспечения в качестве носителей ПРК является далеко не самым эффективным решением, особенно при проведении работ на достаточно больших площадях акватории. Суда обеспечения ограничены собственной автономностью и невозможностью проведения работ при неблагоприятных погодных условиях, а также являются крайне дорогостоящими в эксплуатации. Для снижения расходов, минимизации влияния человеческого фактора, повышения автономности и эффективности ПРК, применяются подводные док-станции. Основными задачами, выполняемыми док-станциями являются зарядка аккумуляторных батарей ПРК, сбор и передача накопленного за миссию массива данных от ПРК к оператору. Наиболее ответственной задачей при взаимодействии ПРК и подводной док-станции является задача стыковки. Поскольку сама концепция применения док-

станций наиболее эффективна при взаимодействии с АНПА, стыковка соответственно должна производиться в автономном режиме.

На **Рис.1** показана типовая схема стыковки ПРК с доком. Реализация стыковки является весьма нетривиальной задачей. Для создания систем стыковки используются оптические, акустические и электромагнитные средства [1-3].

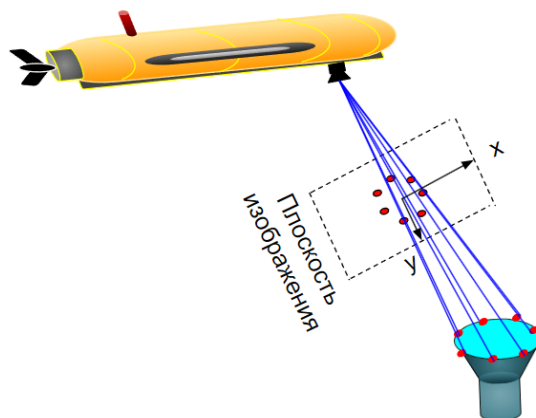


Рис.1 – Схема стыковки ПРК с доком

В [4] используется все три метода и приводится сравнительная таблица, которая показывает, что оптические средства стыковки менее уязвимы к внешним возмущениям и обладают достаточной точностью.

Одним из важнейших аспектов успешного проведения подводной стыковки является возможность непрерывного отслеживания местоположения ПРК по снятым видеокдрам. Для обработки видеокдраов и идентификации источников света, установленных на станции, используется компьютерное зрение [5]. Соответствующие исследования по стыковке ПРК в форме торпеды и ПРК коробчатой формы приведены в [5].

В [6] для идентификации подводных объектов изучался подход, основанный на признаках и шаблонах. Кроме того, в [6] сравниваются методы отслеживания оптического потока и среднего сдвига.

При подводной стыковке такие методы, как вычитание фона и кодовая книга, неприменимы, поскольку камера, установленная на ПРК, находится постоянно в движении. Также существует метод слежения за объектами с помощью движущейся бинокулярной камеры. Метод позволяет отслеживать трехмерные объекты, но одновременная и непрерывная обработка двух видеопотоков увеличивает время, что приводит к снижению частоты кадров и не позволяет работать в реальном времени.

В настоящей работе предполагается идентифицировать док-станцию с помощью системы технического зрения. Обычно искомые подводные объекты обозначаются красным цветом, поэтому в работе в качестве объекта был

выбран красный диск, который идентифицирует место стыковки с док-станцией.

Постановка задачи. Рассматривается задача, в которой ПРК типа MiddleAUV перемещаясь в водной среде должен идентифицировать объект при помощи донной видеокамеры ПРК и определить на изображении принадлежащую объекту целевую точку.

ПРК MiddleAUV (**Рис.2**) имеет два движителя для перемещения в горизонтальной плоскости, два движителя для перемещения в вертикальной плоскости, аккумулятор и навигационно-пилотажный датчик. Также на борту ПРК имеются вперед смотрящая и донная видеокамеры, разрешение изображения которых составляет 680x480 пикселей.

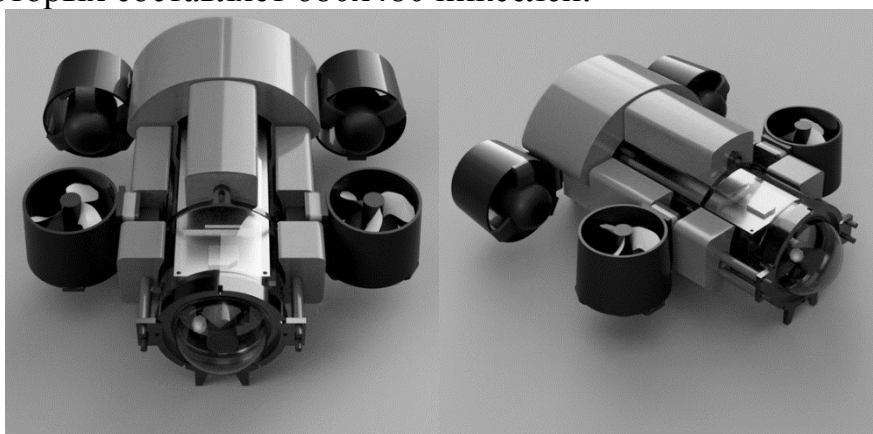


Рис.2 – Внешний вид ПРК типа MiddleAUV

Исследования проводились в бассейне размерами 3300x2350x2210 мм, а также в акватории Черного моря (**Рис.3**) с объектами, расположенными на дне.

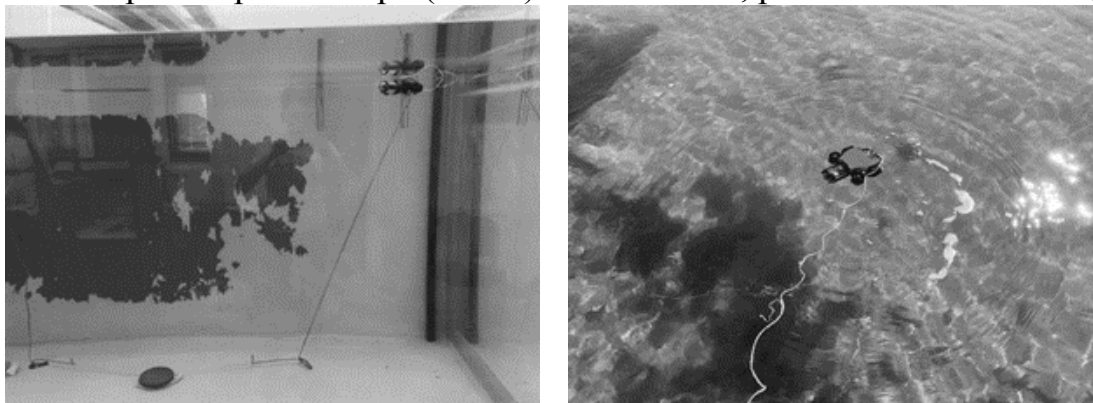


Рис.3 – ПРК и наблюдаемый объект

Обнаружение диска на изображении осуществляется по цвету с выделением контура найденного объекта. В качестве объекта были выбраны искусственная мишень красного цвета, круглой формы. Важно отметить, что искусственный объект выбран в качестве замены источника света.

Решение задачи обнаружения объекта в водной среде. Описание алгоритма по обнаружению объекта в водной среде состоит из получения изображения с камеры ПРК, преобразования цветового пространства, цветового порога, морфологических операций, обнаружения и распознавания. Схема работы предлагаемого алгоритма показана на **Рис.4**. Камера соответствует для работы в режиме реального времени, так как обеспечивает частоту кадров не менее 25 Гц при разрешении 680 пикселей по ширине и 480 пикселей по высоте. На **Рис.6(а)** и **Рис.7(а)** показано изображение, полученное с помощью камеры, на котором присутствует искусственный объект (красный диск).

Полученное изображение имеет цветовое пространство Red-Green-Blue (RGB). Пространство изображения в формате RGB представляет массив трехмерных векторов, которыми задаются координаты каждого элемента в массиве. При работе алгоритма следует учитывать, что водная среда является одним из самых сложных условий обнаружения объектов. Сложности могут возникать постоянно. Это изменяющиеся условия освещения, прозрачность воды, видимость до объекта, а также цвет, который постоянно искажается.



Рис.4 – Алгоритм распознавания

При разной освещенности один и тот же объект будет иметь разные оттенки цветов. На **Рис.5** приведены примеры гистограммы распределения RGB, построенные для красного диска (выделен на рисунках белым контуром). Из рисунка видно, что распределение меняется от условий съемки несмотря на то, что сцена на изображении не меняется.

В связи с этим выделение интересующего объекта в водной среде с помощью канала RGB затруднено. При решении задачи важно сохранение цвета при различных условиях освещения. Одним из альтернативных вариантов является использование цветового пространства Hue-Saturation-Value (HSV). В отличие от RGB в HSV интенсивность изображения отделена цветовой информацией, что облегчает фильтрацию объектов интереса. Воспользуемся формулой, которая представлена в работе [7] и модернизируем ее. На **Рис.6(б)** и

Рис.7(б) показано преобразование HSV изображения из предыдущего RGB-изображения по следующей формуле:

$$V = \text{MAX}(R, G, B)$$

$$H = \begin{cases} \frac{60(G - B)}{V - \text{MIN}(R, G, B)}, & \text{если } V = R \\ \frac{120 + 60(B - R)}{V - \text{MIN}(R, G, B)}, & \text{если } V = G \\ \frac{240 + 60(R - G)}{V - \text{MIN}(R, G, B)}, & \text{если } V = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} \frac{V - \text{MIN}(R, G, B)}{V}, & \text{если } V \neq 0 \\ 0, & \text{если } V = 0 \end{cases}$$

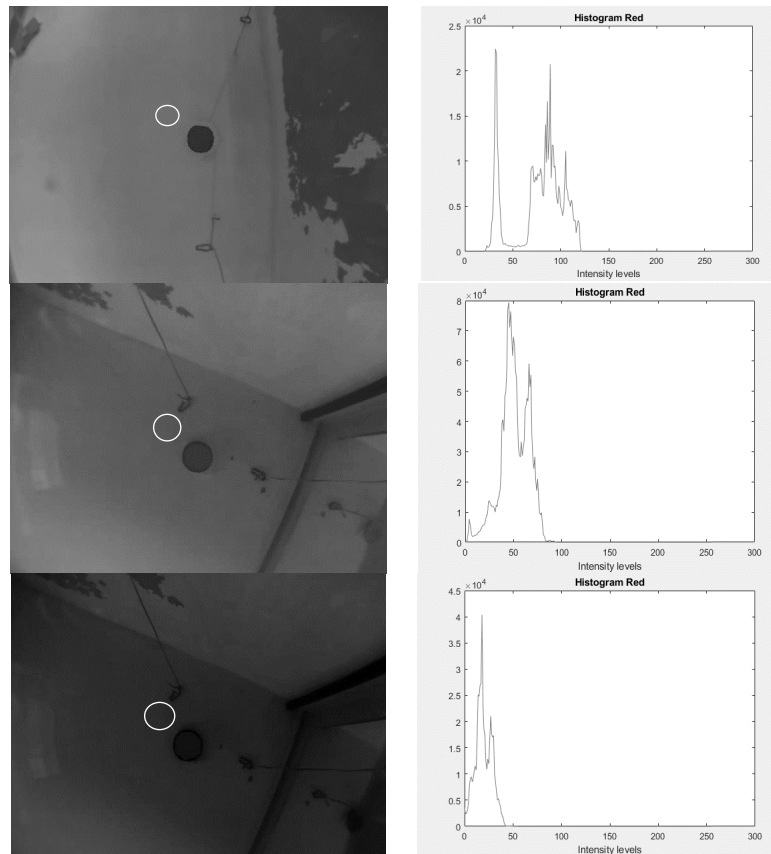


Рис.5 – Гистограмма распределения красного цвета в формате RGB

Измерив цветовую гамму интересующего нас объекта в формате HSV, определили, что цветовой тон (Hue) для красного предмета равен от 0 до 30

градусов. Диапазон значений (Saturation) и Value возьмем с максимально большим диапазоном, чтобы иметь возможность определять цвета при различных изменениях освещения. Поэтому нижняя и верхняя граница цвета будет иметь значения для красного цвета $hsv_min = (0,30,0)$; $hsv_max = (30,255,250)$. Для поиска объекта в морской среде были подобраны другие значения параметров цвета. Цветовой тон (Hue) равен от 5 до 20 градусов и от 165 до 180 градусов. Диапазон значений Saturation (насыщенность) возьмем от 50 до 230 градусов и Value (яркость) возьмем от 50 до 240 градусов. Нижняя и верхняя граница цвета будет иметь значения $hsv_min = (5,50,50)$; $hsv_max = (20,230,240)$. Здесь hsv_min – трехмерный вектор, описывающий нижнюю границу искомого цвета, предоставленного в формате HSV, hsv_max – трехмерный вектор, описывающий верхнюю границу искомого цвета, предоставленного в формате HSV. Далее следует пороговая обработка цвета. Цветовое пороговое выделение цвета является одним из методов сегментации изображений. В результате получается бинарное изображение, состоящее из черного пикселя со значением 0 и белого пикселя со значением 255. На **Рис.6(в)** и **Рис.7(в)** показан результат.

Изображение, полученное после цветового порогового разделения, содержит зашумленные белые пиксели. Поэтому для удаления этих шумов с сохранением формы и размера объекта используются морфологические операции. Процесс включает в себя эрозию и дилатацию. Эрозия устраняет мелкие шумы, а дилатация восстанавливает исходную форму объекта. Для эрозии использовался структурирующий элемент прямоугольной формы 3x3, а для дилатации 8x8. На **Рис.6(г)** и **Рис.7(г)** показан результат морфологических операций.

Дальше на обработанном изображении происходит поиск контуров, когда каждая связанная компонента белых пикселей на изображении классифицируется как отдельный объект. Затем вычисляется момент контура с использованием теоремы Грина. На последнем этапе происходит фильтрация контура, при которой минимальная площадь устанавливается равной 15x15 пикселей. Площадь контура меньше этого значения, считается шумами. На **Рис.6(д)** и **Рис.7(д)** показан обнаруженный объект. Данных обнаружения будет недостаточно для определения положения и ориентации входа в стыковочный узел. В этом случае требуется нахождение центра тяжести у объекта. Центр тяжести найденный на объекте показан на **Рис.6(е)** и **Рис.7(е)**.

Эта информация будет актуальна для ПРК, чтобы иметь сформулированный опорный угол атаки во время стыковки.

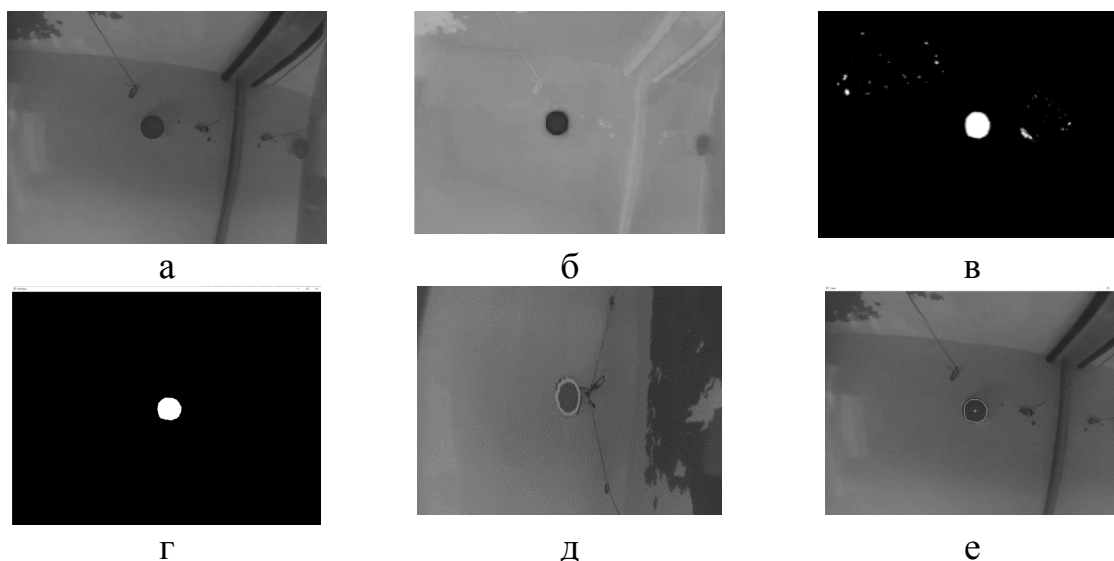


Рис.6 – Результаты работы алгоритма в бассейне:
а) исходное изображение; б) изображение в формате HSV,
в) изображение с шумами; г) изображение после морфологических
операций; д) найденный объект, е) найденный центрорид у объекта

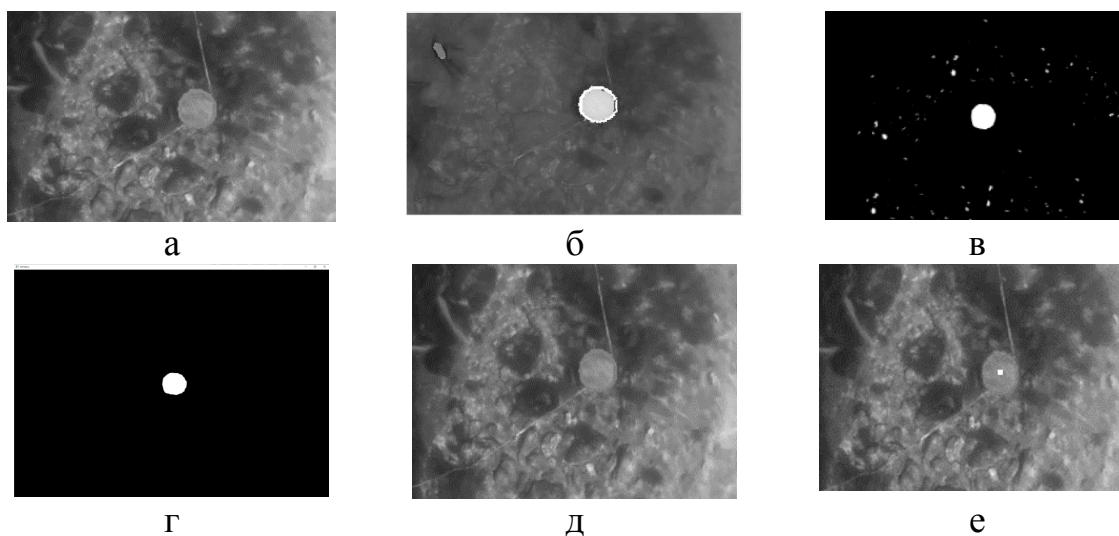


Рис.7 – Результаты работы алгоритма в морской среде:
а) исходное изображение; б) изображение в формате HSV,
в) изображение с шумами; г) изображение после морфологических
операций; д) найденный объект, е) найденный центрорид у объекта

Заключение. Разработан алгоритм обнаружения и распознавания искусственного объекта, который представляет собой источник света на стыковочном узле. Параметром для идентификации источника света в подводной среде является цветовой диапазон HSV. Результаты тестирования

показали, что алгоритм работает корректно и стабильно, подтвердил работоспособность в реальных условиях и может быть применен в системе ПРК.

Однако, стоит заметить, что успешное распознавание объекта также зависит от скорости движения ПРК. Во время стыковки ПРК должен двигаться с очень низкой и равномерной скоростью, чтобы не потерять объект и гарантировать успешную стыковку. Также, если цель движется, то алгоритм сможет отслеживать объект при условии, что движение в пределах допустимой скорости, что подлежит дальнейшим экспериментам.

Библиографический список

1. Hong Y.H. Development of the homing and docking algorithm for AUV / Y.H. Hong [et.al.]// Proceedings of ISOPE. – 2003. – pp. 205 –212.
2. Allen B.G. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology / B.G. Allen [et.al.] // IEEE Proceedings of OCEANS. – 2006. – pp. 1–6.
3. Zhang Y.W. Selfdocking capability and control strategy of electromagnetic docking technology / Y.W. Zhang [et.al.] // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2011.– №36(3) – pp 1073–1081.
4. Deltheil C. Simulating an optical guidance system for the recovery of an unmanned underwater vehicle / C. Delthei [et.al.] // IEEE Proceedings of Oceanic Engineering. – 2000. – №25(4). – pp. 568–574.
5. Park J.Y. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera / J.Y. Park [et.al.] // Ocean Engineering. – 2009.– №36(1). – pp. 48–61.
6. Lee D. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots / D. Lee [et.al.] // Ocean Engineering. – 2012.– №48. – pp. 59–68.
7. Kabanov A.A. Detection, recognition and localisation of an object in the aquatic environment with the specified distinctive features with specified distinctive features using a technical stereo vision system / A.A. Kabanov [et.al.] // Management and high technology – 2023. – №2(62). – pp. 59–73.

Bibliograficheskiy spisok

1. Hong Y.H. Development of the homing and docking algorithm for AUV / Y.H. Hong [et.al.]// Proceedings of ISOPE. – 2003. – pp. 205 –212.
2. Allen B.G. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology / B.G. Allen [et.al.] // IEEE Proceedings of OCEANS. – 2006. – pp. 1–6.

3. Zhang Y.W. Selfdocking capability and control strategy of electromagnetic docking technology / Y.W. Zhang [et.al.] // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2011. – №36(3) – pp 1073–1081.
4. Deltheil C. Simulating an optical guidance system for the recovery of an unmanned underwater vehicle / C. Delthei [et.al.] // IEEE Proceedings of Oceanic Engineering. – 2000. – №25(4). – pp. 568–574.
5. Park J.Y. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera / J.Y. Park [et.al.] // Ocean Engineering. – 2009. – №36(1). – pp. 48–61.
6. Lee D. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots / D. Lee [et.al.] // Ocean Engineering. – 2012. – №48. – pp. 59–68.
7. Kabanov A.A. Detection, recognition and localisation of an object in the aquatic environment with the specified distinctive features with specified distinctive features using a technical stereo vision system / A.A. Kabanov [et.al.] // Management and high technology – 2023. – №2(62). – pp. 59–73.

¹Ляшко Александр Дмитриевич, ассистент, младший научный сотрудник, lyasko.sasha@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Васильев Денис Михайлович, ведущий инженер, научный сотрудник, Dep.vas.84@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Крамарь Вадим Александрович, д.т.н., профессор, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

METHOD OF TARGETING AN UNDERWATER ROBOTIC COMPLEXES USING VIDEO SYSTEMS

A.D. Liashko, D.M. Vasiliev, V.A. Kramar

Underwater robotic complexes play an important role in underwater exploration. However, their potential is limited by on-board battery power and data storage capacity. This problem was solved with an underwater docking system. The underwater docking platform can be used as a recharging station to continue underwater robotic complexes operation as well as its data transfer. The paper proposes the recognition algorithm based on a round-shaped docking unit detection at a distance up to 5 meters in an aquatic environment using a camera mounted on an underwater robotic complex. The experimental part was carried out in the SevSU

basin research laboratory and the Black Sea area. The obtained results confirmed algorithm efficiency.

Key words: underwater robotic complexes, underwater docking, underwater object recognition, computer vision.

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

Vasilyev Denis Mikhailovich, lead engineer, researcher, Den.vas.84@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

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

УДК 681.522

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КУРСОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ МОРСКОЙ НАДВОДНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Никишин В.В.¹, Вожжов А.А.²

Аннотация. Представлено решение прикладной задачи коррекции измерений на базе инерциальных тета-датчиков и алгоритмов нелинейной фильтрации, решение которой необходимо для достижения управления роботами. Разработана программная имитационная модель робота и представлены результаты вычислительных экспериментов, произведенных на ее основе; полученные данные при этом являются основой для выбора оптимальных сценариев работы системы, дают возможность адаптивно учитывать пространственно-временную изменчивость среды.

Ключевые слова. Курсовая устойчивость, поднастройка, автономные роботы, интеллектуальный анализ данных, интеллектуальные системы, система поддержки принятия решений.

Введение.

Разработка систем мониторинга водной среды прибрежной и шельфовой зон моря является актуальной задачей обеспечения экологической безопасности и океанологии, оказывающей значительное экономическое влияние на рекреационные регионы и качество жизни человека в целом [1–4]. Возможность выявления аномальных состояний водной среды включает регистрацию ключевых для решения задачи мониторинга параметров P , собираемых с необходимой временной периодичностью, требуемым шагом пространственной сетки и применением интеллектуальных средств анализа данных [5, 6].

Исследования направлены на разработку математической модели и алгоритма обеспечения курсовой ориентации МНПМ «Барабулька», и должны лечь в основу построения системы оперативного мониторинга водной среды, позволяющей оперативно выявлять аномальности протекающих в ней процессов.

Набор датчиков устанавливается на борту МНМП «Барабулька», которая предназначена для изучения поведения беспилотных надводных устройств (БНУ) в различных режимах работы; предлагается разработка законов управления и программного обеспечения для систем управления и для отработки конструкторских решений БНУ. Результаты могут быть использованы для обследования водоемов, в которых традиционные

плавсредства нецелесообразно или дорого доставлять и использовать - мелких водохранилищ, прудов охладителей АЭС, устьев бухт, в которых вероятна сезонная изменчивость дна.

Основная часть

Математическая модель, используемая в настоящей работе, реализована с помощью одношагового метода Эйлера. Данный метод обладает известными недостатками, но они нивелируются простотой и малым количеством вычислительных операций [7].

Математическая модель МНМП «Барабулька» как объекта, разработана с применением классической Ньютоновской механики твёрдого тела. Движение МНМП «Барабулька» обусловлено двумя основными составляющими сил - силы, создаваемой движителем F , и силы сопротивления D . Тогда ускорение, получаемое телом согласно II-му закону Ньютона:

$$a = \frac{F - D}{m} . \quad (1)$$

Сила тяги, создаваемая движителем в математическая модель задается оператором или управляющим воздействием, формируемым САУ.

Сила сопротивления рассчитывается в соответствии с формулой гидродинамического сопротивления:

$$D = C_x \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{S} , \quad (2)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления МНМП; ρ – плотность среды; V – скорость движения МНМП «Барабулька»; S – площадь поперечного сечения к набегающему потоку.

Согласно методу Эйлера интегрирование моделируемой скорости БНА осуществляется численным методом:

$$V_t = V_{t-1} + a \cdot dt , \quad (3)$$

где V_t – скорость МНМП «Барабулька» в данный момент моделируемого времени; V_{t-1} – скорость МНМП «Барабулька» в предыдущий момент моделируемого времени; dt – шаг интегрирования уравнения.

Шаг интегрирования dt в разработанной математической модели возможно изменять.

Согласно модели реальный прототип двигается по поверхности. Задача моделирования движения сводится к движению на плоскости, поэтому при изменении направления движения (курса) необходимо учитывать проекции вектора скорости на оси глобальной системы координат.

$$x_t = x_{t-1} + V \cdot dt \quad (4)$$

$$V_x = V \cdot \cos(yaw) , \quad (5)$$

$$V_x = V \cdot \sin(yaw), \quad (6)$$

где yaw – угол направления движения МНМП «Барабулька» в глобальной системе координат

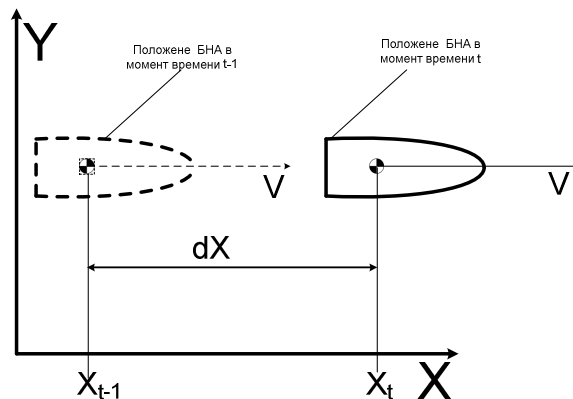


Рис.1 – Одношаговый метод Эйлера

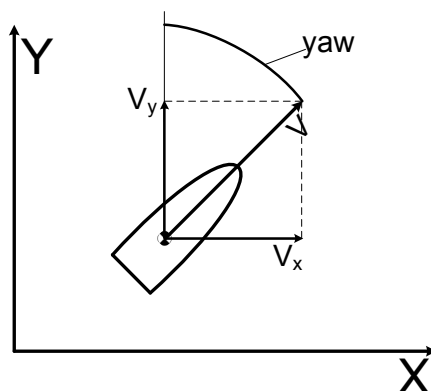


Рис.2 – Проекция скорости МНМП «Барабулька» в глобальной системе координат

Для разработки системы измерения курсовой ориентации использовался МЭМС-магнитометр НМС5883L, так как его небольшие размеры позволяют его легко интегрировать в систему навигации малогабаритных беспилотных морских аппаратов.

Магнитометр представляет собой устройство для измерения составляющих магнитного поля по трем осям X , Y и Z .

Для вычисления курса беспилотного аппарата необходимо рассчитать угол φ (**Рис.3**). С этой целью необходимо провести математическую обработку данных магнитометра.

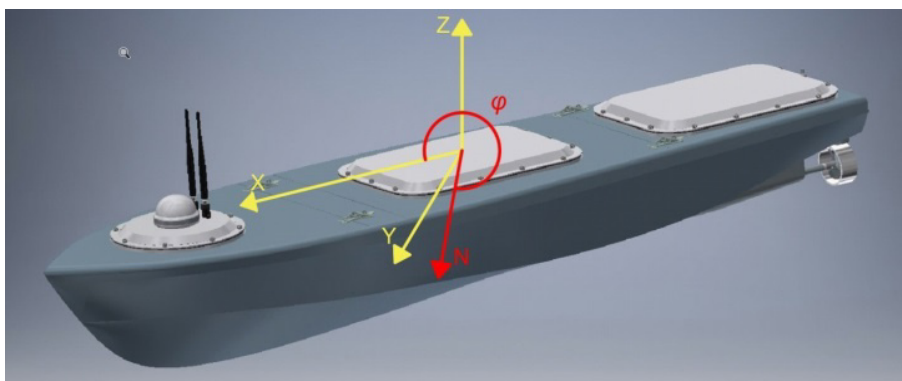


Рис.3 – Беспилотный аппарат

При применении магнитометров в составе сложных устройств возникают дополнительные магнитные поля и на датчик действуют помехи, искажающие его показания.

Существуют два типа искажений, действующих на компас. Первое называется искажением твердого железа (Hard Iron Distortion). Оно по своей природе является аддитивным, то есть к изначально измеряемому полю добавляется дополнительное, создаваемое постоянным магнитом. При неизменной ориентации такого магнита относительно датчика, смещение, вносимое им, будет также неизменно. Для компенсации такого типа воздействия необходимо устранить смещение данных относительно начала координат (**Рис.4а**).

Ко второму типу относится искажение мягкого железа (Soft Iron Distortion). Оно создается посторонними предметами, искажающими уже имеющееся магнитное поле. Например, предметы, выполненные из пермаллоя, никеля и т.п., не создают своего магнитного поля, но изменяют форму поля, измеряемого датчиком (рисунок 4б).

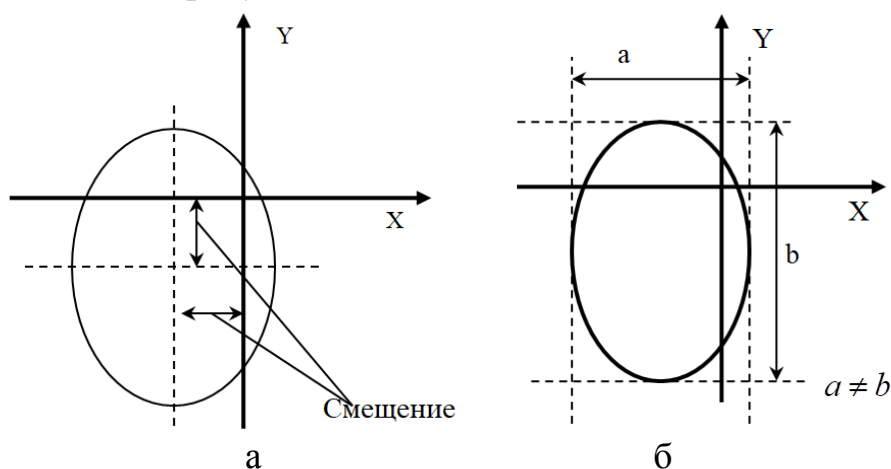


Рис.4 – Результат воздействия твердого (а) и мягкого (б) железа на данные магнитометра

Для компенсации влияния твердого железа фиксируем данные датчика в трех плоскостях координат. В начале процедуры устранения искажений датчик располагается горизонтально, и вокруг вертикальной оси совершается, как минимум, один полный оборот. Аналогичные действия совершаются в двух других плоскостях. Затем выделяются точки, имеющие максимальное и минимальное значение по осям X , Y и Z . Найденные значения максимумов и минимумов используются для нахождения коэффициентов смещения нуля:

$$\begin{cases} k_{CX} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2} \\ k_{CY} = \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2} \\ k_{CZ} = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

где k_{CX} , k_{CY} , k_{CZ} – коэффициенты смещения нуля по осям X , Y и Z ; X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min} , Z_{max} , Z_{min} – максимальные и минимальные значения по осям X , Y и Z .

Через найденные коэффициенты и изначально полученные данные (X , Y , Z) можно выразить скорректированные по методу компенсации твердого железа величины по осям X , Y и Z :

$$\begin{cases} X_C = X - k_{CX} \\ Y_C = Y - k_{CY} \\ Z_C = Z - k_{CZ}, \end{cases} \quad (8)$$

где X_C , Y_C , Z_C – скорректированные значения по осям X , Y и Z ; X , Y , Z – корректируемые данные, полученные с датчика.

Для проведения компенсации необходимо найти диаметры по каждой оси, используя формулу (6.3), и определить максимальный из них:

$$\begin{cases} d_x = X_{max} - X_{min} \\ d_y = Y_{max} - Y_{min} \\ d_z = Z_{max} - Z_{min}, \end{cases} \quad (9)$$

где d_x , d_y и d_z – диаметры по осям X , Y и Z ; X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min} , Z_{max} , Z_{min} – максимальные и минимальные значения по осям X , Y и Z .

Масштабные коэффициенты, которые необходимы для дальнейшего преобразования формы окружностей, определяются по формуле (10):

$$\begin{cases} k_x = \frac{d_{max}}{d_x} \\ k_y = \frac{d_{max}}{d_y} \\ k_z = \frac{d_{max}}{d_z}, \end{cases} \quad (10)$$

где k_x , k_y и k_z – коэффициенты масштабирования по осям X , Y и Z ; d_{max} – максимальный диаметр.

Найденные коэффициенты умножаем на каждый соответствующий элемент массива данных, получаем исправленные значения:

$$\begin{cases} X_C = k_x \cdot X \\ Y_C = k_y \cdot Y \\ Z_C = k_z \cdot Z, \end{cases} \quad (11)$$

где X_C , Y_C , Z_C – скорректированные значения по осям X , Y и Z ; X , Y , Z – корректируемые данные, полученные с датчика.

Результат компенсации можно видеть на рисунке 5.

На **Рис.5** приведены трехмерные графики до и после компенсации влияния мягкого и твердого железа.

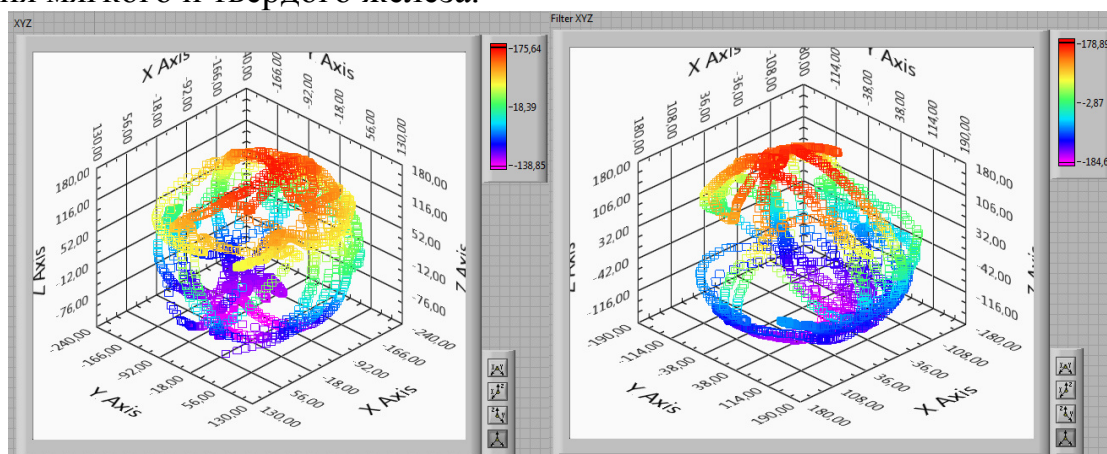


Рис.5 – График до и после компенсации влияния мягкого и твердого железа

После того как данные, полученные с датчика, скорректированы можно воспользоваться формулой для определения направления относительно магнитного поля Земли. Для этого, при условии горизонтального расположения платформы, необходимо считать данные с выходных регистров осей X и Y , а затем вычислить арктангенс угла в соответствии с (12):

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Y_c}{X_c}\right) * \frac{180}{\pi} + 6.67 \quad (12)$$

В данной формуле арктангенс умножается на 180° и делится на число π для перевода курса беспилотного аппарата в градусы.

Необходимо также учитывать и то, что существует отличие между географическим и магнитным севером, называемое магнитным склонением. Значение магнитного склонения для г. Севастополя в 2024 году составляет примерно $6,67^\circ$. Данное значение внесено в ПО в качестве поправки.

Программа для обработки данных получаемых от магнитометра и вычисления курса беспилотного аппарата была создана с помощью Visual Studio C#.

Полученные результаты Испытание системы измерения курсовой ориентации беспилотного аппарата показало, что она полностью работоспособна и показывает достоверные значения в пределах 0-360 градусов, с погрешностью ± 5 гр, что для контроля движением беспилотного аппарата достаточно.

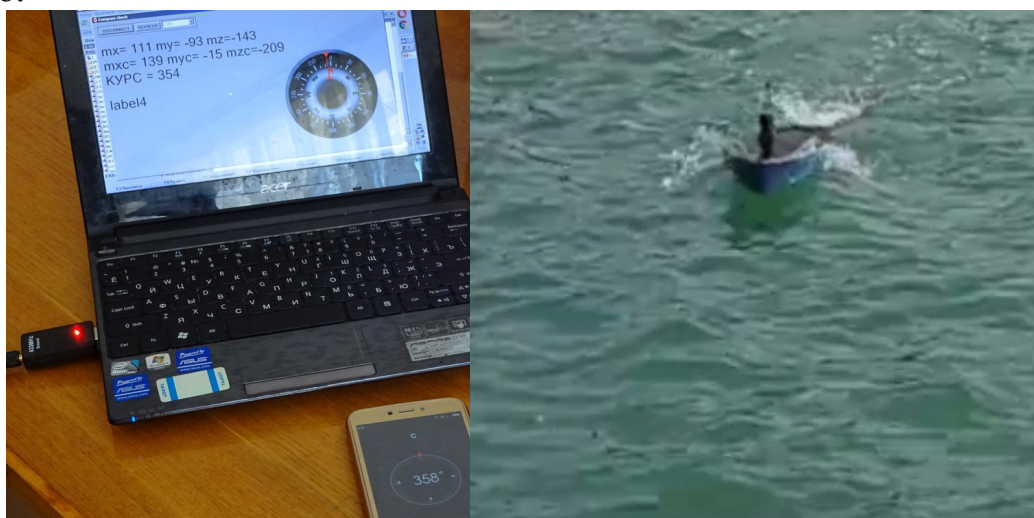


Рис.6 – Испытание системы измерения курсовой ориентации

Выполненная работа носит прикладной научно-технический характер, результатом которой в будущем станет создание прототипа сложного программно-аппаратного комплекса для экологического мониторинга акваторий морей и озер, что для Крыма и Севастополя является актуальным направлением.

Библиографический список

1. Tyler A.N. Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters / A.N. Tyler, P.D. Hunter, E. Spyarakos // Science of The Total Environmen. – 2016. – vol. 572.

– pp.1307–1321.

2. Yunev O. Reconstructing the trophic history of the Black Sea shelf / O. Yunev, V.Velikova, J Carstensen // *Continental Shelf Research*. –2017. – vol. 150. – pp.1–9.
3. Shishkin I.E. Analysis of Image Clusterization Methods for Oceanographical Equipment / I.E. Shishkin, A.N. Grekov // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. – pp.1–6.
4. Zhai C. Distributed sweep coverage algorithm of multi-agent systems using workload memory / C. Zhai, G. Xiao, M.Z.Q. Chen // *Systems & Control Letters*. – 2019. – vol.124. – pp.75–82.
5. Man Y. Human factor issues during remote ship monitoring tasks: An ecological lesson for system design in a distributed context / Y. Man, R. Weber, J. Cimbritz // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2018. – vol.68. – pp. 231–244.
6. Grekov A.N. The Input Parameters Measurement Uncertainty When Calculating the Sea Water Density / A.N. Grekov, N.A. Grekov, E.N. Sychov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – pp. 1–5.
7. Муха Т.В. Разработка системы измерения курсовой ориентации беспилотного аппарата / Т.В. Муха, В.В. Никишин // Материалы региональной студенческой научно-технической конференции «Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта». – 2018.

Bibliograficheskiy spisok

1. Tyler A.N. Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters / A.N. Tyler, P.D. Hunter, E. Spyrakos // *Science of The Total Environmen*. – 2016. – vol. 572. – pp.1307–1321.
2. Yunev O. Reconstructing the trophic history of the Black Sea shelf / O. Yunev, V.Velikova, J Carstensen // *Continental Shelf Research*. –2017. – vol. 150. – pp.1–9.
3. Shishkin I.E. Analysis of Image Clusterization Methods for Oceanographical Equipment / I.E. Shishkin, A.N. Grekov // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. – pp.1–6.
4. Zhai C. Distributed sweep coverage algorithm of multi-agent systems using workload memory / C. Zhai, G. Xiao, M.Z.Q. Chen // *Systems & Control Letters*. – 2019. – vol.124. – pp.75–82.
5. Man Y. Human factor issues during remote ship monitoring tasks: An ecological lesson for system design in a distributed context / Y. Man, R. Weber, J. Cimbritz // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2018. – vol.68. – pp. 231–244.

6. Grekov A.N. The Input Parameters Measurement Uncertainty When Calculating the Sea Water Density / A.N. Grekov, N.A. Grekov, E.N. Sychov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – pp. 1–5.
7. Muha T.V. Razrabotka sistemy izmereniya kursovoj orientacii bespilotnogo apparata / T.V. Muha, V.V. Nikishin // Materialy regional'noj studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Progressivnye napravleniya razvitiya mashinopriborostroitel'nyh otraslej i transporta». – 2018.

¹Никишин Владимир Владимирович, к.т.н., доцент,
VVNikishin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

²Вожжов Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент,
AAVozhzhov@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF A COURSE ORIENTATION SYSTEM FOR A MARINE SURFACE MULTI-FUNCTIONAL PLATFORM

V.V. Nikishin, A.A. Vozhzhov

A solution to the applied problem of measurement correction based on inertial mems sensors and nonlinear filtering algorithms is presented, the solution of which is necessary to achieve robot control. A software simulation model of the robot has been developed and the results of computational experiments carried out on its basis are presented; the data obtained are the basis for selecting optimal scenarios for the system's operation and make it possible to adaptively take into account the spatio-temporal variability of the environment.

Keywords: directional stability, adjustment, autonomous robots, data mining, intelligent systems, decision support system.

*Nikishin Vladimir Vladimirovich, candidate of technical science, docent,
VVNikishin@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Vozhzhov Andrey Anatolievich, candidate of technical science, docent,
AAVozhzhov@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗООБМЕНА В ЛЕГКИХ ПРИ ЖИДКОСТНОМ ДЫХАНИИ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА С ЗАМКНУТЫМ ДЫХАТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ

Поливцев В.П.¹, Балакин А.И.², Поливцев В.В.³, Гарматюк М.И.⁴, Рощупкин С.И.⁵

Аннотация. *Сделан обзор разработанных медицинских аппаратов жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром. Предлагаются исследования технологии жидкостного дыхания для аппарата с замкнутым дыхательным контуром. Предложена схема, в основе которой используется способ ультразвукового удаления газов, а также схема оксигенации (насыщения) дыхательной жидкости барботированием. Исследованы характеристики по расходу и давлению насосов контуров вдоха и выдоха. Определены безопасные режимы работы аппарата и выполнены расчеты дыхательного объема на кг массы биообъекта. Представлены физические модели газообмена в легких биообъекта при атмосферном и жидкостном дыхании. Приведены графики работы контуров вдоха/выдоха. Представленная физическая модель газообмена в легких при жидкостном дыхании подтверждена результатами.*

Ключевые слова. *Жидкостное дыхание, дыхательный объем, дыхательная жидкость, эндотрахеальная трубка, замкнутый дыхательный контур, частота дыхания, концентрация растворенного кислорода, измерение концентрации кислорода, избыточное давление, абсолютное давление.*

Введение.

Опыты и эксперименты применения технологии жидкостного дыхания для частичной жидкостной вентиляции легких (ЧЖВЛ) и тотальной жидкостной вентиляции легких (ТЖВЛ) в медицинских целях достаточно широко описаны в литературе [1–3]. В качестве жидкостей заменяющей воздух для медицинских целей или различные газовые смеси (например, тримикс или гелиокс) для погружения на большие глубины стали использовать известные жидкости медицинского качества мировых фирм: DuPont (США), ICI и F2 (Великобритания), Elf-Atochem (Франция). Перфторуглеродные жидкости (первтордекалин, карбогал и перфлуброн), исследованные в Санкт-Петербургском институте прикладной химии, лидируют по применению в медицине и косметологии [4].

Однако возникает значительная проблема от высокой плотности применяемой дыхательной жидкости и соответствующего снижения ее способности удалять CO_2 . Любое использование жидкостного дыхания для погружения под воду или в медицинских целях, включает полную жидкостную

вентиляцию легких дыхательной жидкостью. Однако полная жидкостная вентиляция затрудняет перемещение достаточного количества жидкости для уноса в первую очередь из легких CO_2 , и подачу в легкие O_2 . Ограничение происходит потому, что количество парциального давления газа CO_2 , доступного для растворения CO_2 в дыхательной жидкости никогда не может быть намного больше, чем давление, при котором CO_2 существует в крови (около 40 мм рт. Ст.), и поступает через альвеолы в легкие и удаляется из легких [5]. Для удаления CO_2 непосредственно из венозной крови в 2008 году американский хирург Арнольд Ланде (Arnold Lande) запатентовал водолазный костюм с использованием технологии жидкостной вентиляции. Вместо сжатого газа он предложил использовать перфторуглероды, а избыток углекислоты, которая будет образовываться в крови, выводить при помощи искусственных жабр, «воткнутых» прямо в бедренную вену водолаза [6].

В работах одного из ведущих специалистов по жидкостной вентиляции легких из Шербрукского университета в Канаде Филипп Мишо (Philippe Mischeau), делается вывод, что проект Ланде выглядит в настоящий момент не реализуемым. В экспериментах (Мишо и его коллег) приводятся экспериментальные данные проведенные на ягнятах и крольчатах по тотальному жидкостному дыханию животных, которые находятся под анестезией и не двигаются с организацией нормального газообмена по доставке кислорода и удалению углекислого газа. Современное состояние жидкостного дыхания по заключению Мишо для тотальной вентиляции, как в нормо так и гипербарии требует создания эффективных систем насосов, которые бы помогали закачивать и выкачивать жидкость из легких человека, когда он двигается и выполняет какую-то работу, до сих пор не разработаны [5, 6, 7].

Однако применение этой технологии не только для глубоководных работ продолжает исследоваться и для других, медицинских целей. Например, для помощи утонувшим, промывания легких при различных заболеваниях или быстрого понижения температуры тела (применяется в случаях реанимации при остановке сердца у взрослых и новорожденных с гипоксически-ишемическим поражением мозга), для лечения осложнений от возбудителя новой коронавирусной инфекции COVID-19 – коронавируса SARS-CoV-2, основной мишенью которого являются альвеолярные клетки II типа (AT2) легких, что вызывает развитие пневмонии.

Актуальной задачей в области жидкостной вентиляции легких является разработка и создание надежного аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких, удовлетворяющего необходимым физиологическим процессам нормального газообмена по доставке кислорода и удалению углекислого газа из легких.

Основная часть.

Для длительной (более 30 минут) жидкостной искусственной вентиляции легких человека требуется создание аппарата с замкнутым дыхательным контуром, который бы обеспечивал подачу дыхательной жидкости и ее удаление из легких, удаление углекислого газа из дыхательной жидкости и насыщение ее кислородом. Создание аппарата для жидкостной искусственной вентиляции легких требует решения ряда конструкторских задач:

- создание контура вдоха и контура выдоха обеспечивающих одинаковый дыхательный объем с требуемой точностью и с параметрами давления и расхода соответствующие параметрам подачи кислорода и удаления углекислого газа;

- создание аппарата жидкостного дыхания в условиях нормобарии с замкнутым дыхательным контуром и параметрами давления, расхода жидкости, дыхательного объема и частоты дыхания, обеспечивающих баланс по количеству кислорода при его подаче в легкие и по количеству углекислого газа при его удалении из крови и легких за единицу времени (минуту), при жидкостном дыхании, соответствующем дыханию атмосферным воздухом;

- поддержание температурного режима дыхательной жидкости, ее фильтрацию и обеззараживание после каждого цикла вдох/выдох.

Коллективом НИЛ ЭСЖБО СевГУ были созданы аппараты принудительного (искусственного) жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром [8, 9, 10, 11].

На **Рис.1** представлена функциональная схема аппарата жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром. Экспериментальный медицинский аппарат принудительного жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром (**Рис.1**) состоит из контура вдоха, включающего электромагнитный клапан К2, датчик расхода жидкости ДР2, датчик давления ДД1, насосы Н2 и Н3, эластичную емкость ЕЭ2, шаровой кран КШ2 залива/слива ПФУ и трубопроводы, фитинги, соединяющие их. Контур выдоха состоит из электромагнитного клапана К1, датчика расхода жидкости ДР1, насоса Н1, эластичной емкости ЕЭ1, шарового крана КШ1 залива/слива ПФУ, трубопроводов и фитингов. Контуры вдоха и выдоха подключены к легким Л биологического объекта или имитатора легких. Замкнутый дыхательный контур включает фильтр Ф1, обеззараживатель ОУ, насос Н4, ультразвуковой газоудалитель ГУ, устройство оксигенации и терморегуляции УОТ с системой подачи кислорода, шаровых кранов КШ3 и КШ4 залива/слива ПФУ.

В устройство УОТ входит датчик уровня жидкости ДУ, нагреватель, регулируемый клапан сброса газа по давлению КП, насос Н5, фильтр Ф2 и обратный клапан ОК для сброса избытка не растворенных пузырьков кислорода и датчик температуры жидкости ДТ. Система подачи кислорода состоит из

кислородной станции, пропорционального регулятора давления РДП, дросселя Др, электромагнитного клапана К3, датчика давления ДД2 и датчика расхода ДР3. Элементы, приведенные на функциональной схеме, управляются при помощи системы управления (на схеме не изображена). Цикл вдох/выдох осуществляется с дыхательным объемом от 0,1 до 0,4 л. Соотношение вдох/выдох от 1:2 до 1:3. Число циклов вдох/выдох от 4 до 12 в минуту.

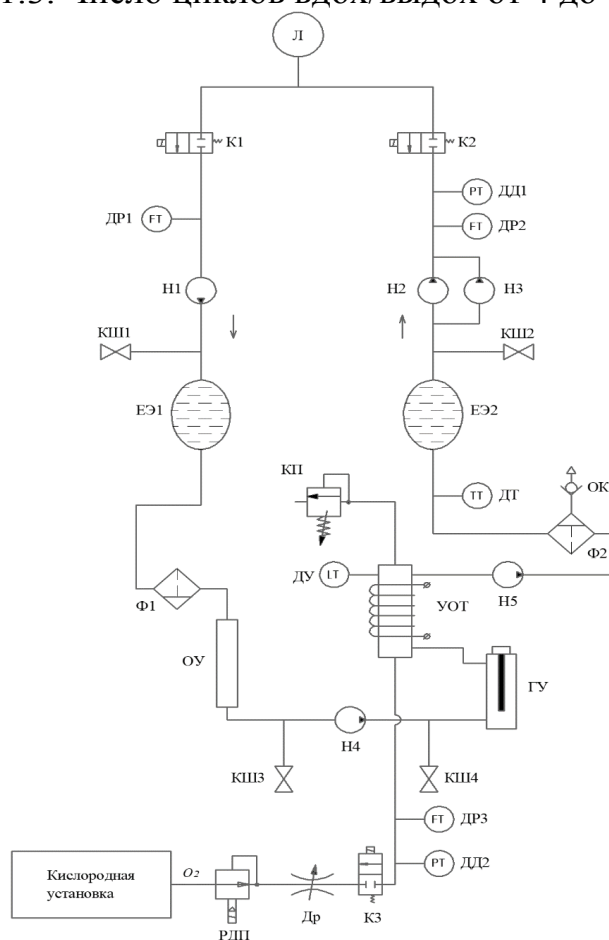


Рис.1 – Функциональная схема медицинского аппарата жидкостной вентиляции легких с замкнутым дыхательным контуром

Работа аппарата заключается в следующем:

При вдохе жидкость (ПФУ) насыщенная кислородом из эластичной емкости ЕЭ2 при помощи насосов Н2 и Н3, соединенных параллельно для увеличения расхода, подается в легкие Л через эндотрахеальную трубку. При этом клапан К2 открыт, а клапан К1 закрыт.

При выдохе клапан К1 открывается, а клапан К2 закрывается, и при помощи насоса Н1 жидкость (ПФУ) из легких Л через эндотрахеальную трубку подается в эластичную емкость ЕЭ1.

Расход жидкости измеряется датчиками расхода ДР1 и ДР2, а давление –

датчиком давления ДД1.

Перекачка жидкости из емкости ЕЭ1 в емкость ЕЭ2 осуществляется при помощи насоса Н4 и Н5. При этом жидкость из емкости ЕЭ1 проходит через фильтр Ф1 в ультрафиолетовый обеззараживатель ОУ, где происходит стерилизация. Затем жидкость подается в ультразвуковой газоудалитель ГУ, в котором ультразвуковой генератор создает интенсивную кавитацию и происходит выделение углекислого газа и азота из жидкости. Далее жидкость поступает в емкость УОТ для оксигенации (насыщения кислородом), удаления углекислого газа и азота. Излишки не растворенного в дыхательной жидкости кислорода отделяются фильтром Ф2 и удаляются через обратный клапан ОК. Затем жидкость проходит через нагреватель в емкость ЕЭ2. Измерение температуры жидкости осуществляется датчиком температуры ДТ. Затем цикл дыхания повторяется.

Важным при проектировании контуров вдоха/выдоха аппарата жидкостного дыхания является расчет и выбор насосов с возможностью регулировки и управления по расходу и давлению с учетом потерь давления в трубопроводах, датчиках давления и расхода, в электро-клапанах и эндотрахеальной трубке.

Аппарат жидкостного дыхания, представленный на **Рис.1**, в контурах вдоха и выдоха имеет насосы вдоха и выдоха: гибкие шланги, фитинги, электро-клапана, датчики расхода и давления. Оба контура вдоха и выдоха соединены с легкими биообъекта (или имитаторами легких) через эндотрахеальную трубку. В данном случае эндотрахеальная трубка по давлению, расходу, скорости потока является ограничивающей и требует расчетов на потери давления, скорости потока (расхода). Максимальный расход подаваемый от насоса, соотношение времени цикла вдох/выдох (на пример 1:2 или 1:3) определяет максимальный дыхательный объем искусственной жидкостной вентиляции легких.

Исследование газообмена в легких при жидкостном принудительном дыхании можно представить, как определение и соответствие минутного баланса количества подачи кислорода и удаления углекислого газа из легких при дыхании человека (биологического объекта) атмосферным воздухом, такому же минутному количеству подаваемых и удаляемых газов при жидкостном дыхании. Для принудительного жидкостного дыхания учитывались опыты на животных, погруженных в дыхательную жидкость, где определялись параметры (частоты дыхания, дыхательного объема и веса животного) при «свободном» (спонтанном) дыхании. Эти параметры отражены в ряде публикаций и составляют по частоте дыхания в минуту от 4 до 8, дыхательный объем от 15 мл/кг до 20 и даже 30 мл/кг веса испытуемого [12]. Большинство авторов отмечают, что при жидкостном спонтанном дыхании

частота дыхания по сравнению с дыханием атмосферным воздухом уменьшается, а дыхательный объем увеличивается.

При дыхании атмосферным воздухом процесс газообмена в легких достаточно изучен [13-16]. Один из наиболее важных процессов, благодаря которому кровь насыщается кислородом и становится артериальной, - это обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью. Альвеолярный и выдыхаемый воздух по своему составу отличаются друг от друга, так как при выдохе к альвеолярному воздуху подмешивается воздух на вдохе. Газообмен в легких можно представить, в виде физической модели (**Рис.2**) [17]. Физическая модель основана на газообмене при свободной прямой и обратной диффузии альвеолярного воздуха с венозной и артериальной кровью. Модель представляет цикл вдоха и выдоха поступающего в легкие воздуха (по составу кислорода, углекислого газа и азота), альвеолярную зону, а также «напряжения» венозной и артериальной крови, которые широко представлены в литературе [18-20].

Переход газов в легких из воздуха альвеолярной зоны в кровь и наоборот, поступление газа из крови в альвеолярную зону и воздух подчиняются определенным физическим законам, связанным с парциальным давлением и коэффициентами растворимости газов. На **Рис.2** в физической модели газообмена в легких представлен состав вдыхаемого, выдыхаемого и альвеолярного воздуха, а также парциальное давление кислорода, углекислого газа и азота («напряжение» крови приведено в процентах (%)) и миллиметрах ртутного столба (мм. рт. ст.).

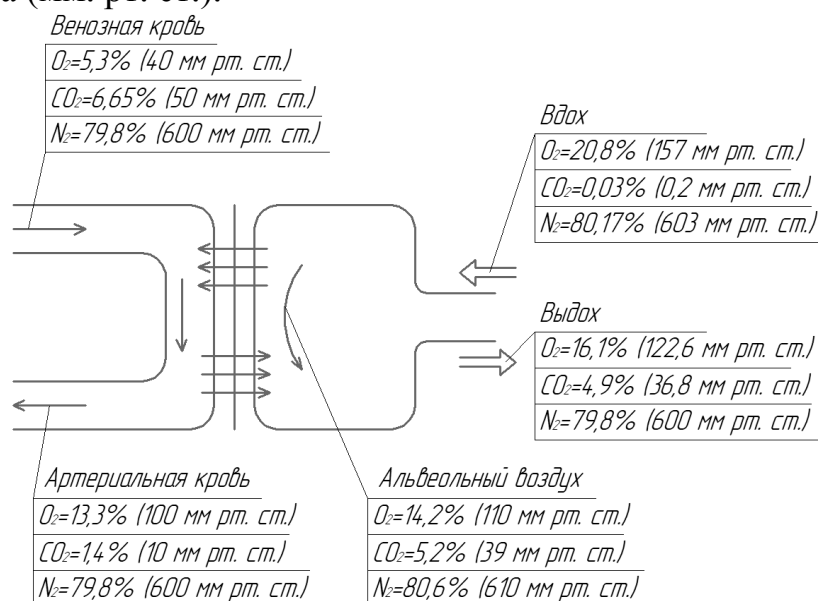


Рис.2 – Физическая модель газообмена в легких при дыхании атмосферным воздухом

Движение газов через стенки альвеол можно полагать как перемещение через биомембрану путем свободной диффузии [20]. Движение газов через мембрану путем свободной диффузии, можно представить, как движение потока вещества за единицу времени в виде:

$$J = dn/dt - 1/S, \quad (1)$$

где n – количество вещества в молях, S – площадь поверхности, перпендикулярная потоку вещества.

По закону Фика поток вещества перемещается путем диффузии пропорционально градиенту концентрации вещества и описывается уравнением:

$$J = -D - dc/dx, \quad (2)$$

где $D = URT$ – коэффициент диффузии, U – подвижность частиц вещества, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

При диффузии через мембрану уравнение (2) может быть записано в виде:

$$J = -K \times (C_1 - C_2), \quad (3)$$

где K – коэффициент проницаемости мембраны, C_1, C_2 – концентрация вещества (газа). Знак минус (-) показывает, что газ с большей концентрацией движется в жидкости с меньшей концентрацией.

Коэффициент проницаемости мембраны, зависит от коэффициента диффузии D , толщины мембраны h , коэффициента распределения вещества q .

$$K = D q / h \times (C_1 - C_2). \quad (4)$$

С учетом (4) и (3) получим следующее выражение:

$$J = -URT q \times (C_1 - C_2) / h. \quad (5)$$

Используя зависимость (5), можно определить перемещение и скорость газа через биомембрану.

Определим минутный баланс по потребляемому взрослым человеком кислорода и удаляемому из крови и легких углекислого газа. Человеком весом до 100 кг в среднем потребляется 5,3% кислорода, выделяется и удаляется из крови и легких 5,3% углекислого газа. Средний дыхательный объем человека составляет 0,5 литра при частоте дыхания 16 раз в минуту.

По $O_2 - 0,5 \text{ л} \times 0,053 \text{ л/л} \times 16/\text{мин.} = 0,424 \text{ л/мин.}$ Аналогично по $CO_2 = 0,424 \text{ л/мин.}$

Технология жидкостного дыхания с принудительной вентиляцией легких с помощью аппаратов искусственной (тотальной) вентиляции с замкнутым дыхательным контуром опирается на исследования и эксперименты с погружением биообъектов в дыхательную жидкость и дыхание за счет собственных легких. Эксперименты проводились на собаках в качестве дыхательной жидкости (ДЖ) использовались – перфтордекалин и карбогал. Частота жидкостного дыхания при этом составляла 4 – 10 раз/мин.

Газообмен в легких при жидкостном дыхании представлен в виде физической модели (Рис.3).

Физическая модель жидкостного дыхания газообмена в легких биообъекта (человека), касающаяся параметров венозной, артериальной крови и альвеолярного объема, аналогичная дыханию атмосферным воздухом. При жидкостном дыхании используется медицинский аппарат (рисунок 1) с принудительной вентиляцией легких. В аппарате присутствуют контуры принудительного вдоха, выдоха и замкнутый контур для удаления газов и насыщения кислородом дыхательной жидкости.

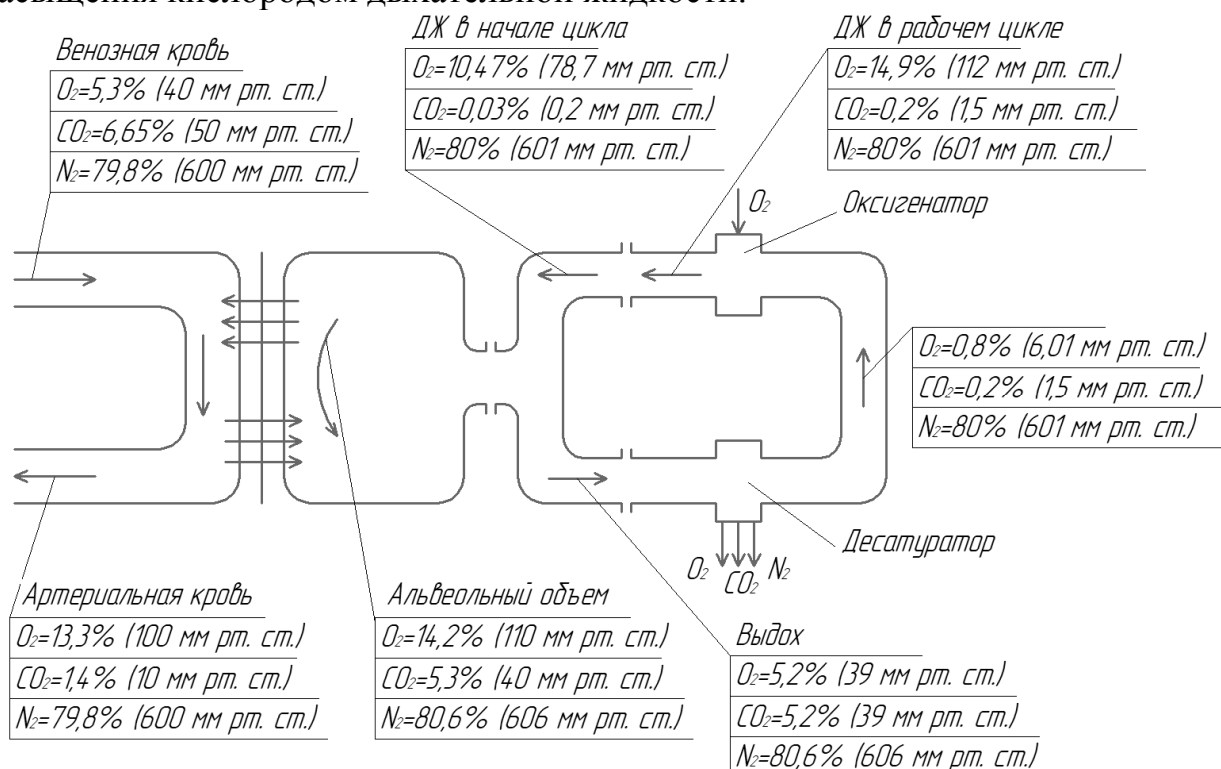


Рис.3 – Физическая модель газообмена в легких при жидкостном дыхании

В дыхательной жидкости (ДЖ) на Рис.3 указаны параметры газов выдыхаемой жидкости, параметры газов после десатурации и два вида параметров газа после оксигенатора при подготовке ДЖ в начале дыхательного цикла и при работе в рабочем цикле и подачи кислорода оксигенатором.

Процесс перехода газов при жидкостном дыхании в легких из венозной артериальной крови в альвеолярное пространство с жидкостью и обратно можно представить, как диффузию газов (O_2 , CO_2 , N_2) через биомембрану под действием парциального давления. Перемещение молекул газа пропорциональны разнице градиентов парциальных давлений газа в крови и альвеолярной области легких [17]. Можно определить скорость диффузии газов

в дыхательной жидкости, которая зависит от градиента давления, растворимости газов в жидкости, площади мембраны, длины диффузионной зоны (толщины мембраны), молярной массы газа, температуры жидкости. Все эти факторы описываются формулой:

$$W = \Delta P \times A \times S / h \times \sqrt{M}, \quad (6)$$

где W – скорость диффузии газов в жидкости через мембрану, ΔP – градиент парциального давления газов, A – площадь мембраны, S – растворимость газов, h – толщина мембраны, M – молекулярная масса газа.

$$Q = S / \sqrt{M}, \quad (7)$$

где Q – диффузионный коэффициент газа. После подстановки (7) в выражение (6) получим:

$$W = \Delta P \times A \times Q / h. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определять относительную скорость, с которой будут диффундировать разные газы при одной и той же величине парциального давления, т.е. пропорционально диффузионному коэффициенту каждого из них. Принимая диффузионный коэффициент кислорода за единицу, относительные диффузионные коэффициенты основных для процесса дыхания газов в жидкостях значения [17]:

- Кислород – 1,0;
- Углекислый газ – 20,3;
- Азот – 0,53;
- Гелий – 0,95.

Определим для жидкостного дыхания основные параметры дыхательного объема, производительности и давления насосов вдоха и выдоха с учетом минутного баланса необходимого кислорода и удаления углекислого газа из легких, как при дыхании атмосферным воздухом, так и с учетом спонтанного жидкостного дыхания, взяв за основу приведенные выше значения объемных величин газов (потребляемого кислорода 5,3 % и выделяемого 5,3 % углекислого газа), требуемых за минуту: $O_2 - 0,5 \text{ л} \times 0,053 \text{ л/л} \times 16/\text{мин.} = 0,424 \text{ л/мин.}$; $CO_2 = 0,424 \text{ л/мин.}$ С учетом значений параметров газов, представленных на рисунке 3 определим минутный баланс необходимый организму испытуемого при подаче на вдохе кислорода при концентрации 10,47%, 14,9% в ДЖ и удаляемому из крови и легких газу при концентрации 5,3%. Результаты необходимого поддержания минутного баланса по кислороду и углекислому газу представлены в таблицах 1...3.

Таблица 1. Результаты расчетов параметров дыхательного объема, минутной производительности насосов цикла вдоха по кислороду при концентрации в ДЖ – 10,47%

Частота дыхания циклов/мин.	Дыхательный объем в литрах	Время цикла общ./вдох в сек.	Расход насосов вдох в л/мин.
4	1,01	15/5	12
6	0,67	10/3,3	12
10	0,4	6/2	12
16	0,25	3,75/1,25	12

Таблица 2. Результаты расчетов параметров дыхательного объема, минутной производительности насосов цикла вдоха по кислороду при концентрации в ДЖ – 14,9%

Частота дыхания циклов/мин.	Дыхательный объем в литрах	Время цикла общ./вдох в сек.	Расход насосов вдох в л/мин.
4	0,71	15/5	8,5
6	0,47	10/3,3	8,5
10	0,284	6/2	8,5
16	0,178	3,75/1,25	8,5

Таблица 3. Результаты расчетов параметров дыхательного объема, минутной производительности насосов цикла вдоха по углекислому газу при концентрации в ДЖ – 5,3%

Частота дыхания циклов/мин.	Дыхательный объем в литрах	Время цикла общ./вдох в сек.	Расход насосов вдох в л/мин.
4	2,0	15/5	24
6	1,33	10/3,3	24
10	0,8	6/2	24
16	0,5	3,75/1,25	24

Как показывает анализ параметров (таблицы 1–3), на производительность насосов вдоха, при соотношении времени вдоха/выдоха 1:2 влияет величина концентрации кислорода подаваемой на вдох ДЖ и концентрация углекислого газа, удаляемого из крови и легких дыхательной жидкости. Наибольшая производительность насосов для подачи ДЖ на вдох (объем вдоха и выдоха должен быть одинаков) требуется при удалении из крови и легких углекислого газа и определяется 24 л/мин. Дыхательный объем и расход ДЖ при удалении углекислого газа из легких ограничен величиной парциального давления 40...50 мм. рт. ст. (концентрацией газа до 6,13%) в венозной крови.

Оба контура вдоха и выдоха соединены с легкими биообъекта (или

имитатором легких) через эндотрахеальную трубку. В данном случае эндотрахеальная трубка по давлению, расходу, скорости потока является ограничивающей и требует расчетов на потери давления, скорости потока (расхода). Так стандартная эндотрахеальная трубка для взрослого человека имеет внутренний диаметр 8 мм, 10,5 мм, максимальную длину 320 мм и определяет пропускную способность дыхательной жидкости, подающейся и удаляемой из легких (таблица 4). В таблице 5 представлен расчет пропускной способности эндотрахеальной трубки с внутренним диаметром – 10 мм, длина 0,32 м.

Таблица 4. Результаты расчетов параметров движения жидкости (эндотрахеальная трубка внутренним диаметром 8 мм, длиной 0,32 м)

Расход	5 л/мин	7,2 л/мин,	9 л/мин	12 л/мин	15 л/мин
Скорость потока	1,66 м/с	2,38 м/с	3,0 м/с	4,0 м/с	4,9 м/с
Потери давления от трения по длине	35,7 мбар	54,9 мбар	101,3 мбар	169 мбар	250 мбар
Максимальный дыхательный объем	0,3 л	0,4 л	0,5 л	0,66 л	0,82 л

Таблица 5. Результаты расчетов параметров движения жидкости (эндотрахеальная трубка внутренним диаметром 10 мм, длиной 0,32 м)

Расход	5 л/мин	10 л/мин	15 л/мин	20 л/мин	30 л/мин
Скорость потока	1,06 м/с	2,12 м/с	3,16 м/с	4,2 м/с	6,3 м/с
Потери давления от трения по длине	12,3 мбар	41,8 мбар	85,5 мбар	143 мбар	296 мбар
Максимальный дыхательный объем	0,3 л	0,5 л	0,6 л	0,75 л	1,0 л

Таблица 6. Результаты расчетов параметров движения жидкости (эндотрахеальная трубка внутренним диаметром 12 мм, длиной 0,32 м)

Расход	5 л/мин	10 л/мин	15 л/мин	20 л/мин	30 л/мин
Скорость потока	0,7 м/с	1,47 м/с	2,21 м/с	2,9 м/с	4,42 м/с
Потери давления от трения по длине	5,1 мбар	17,5 мбар	35,7 мбар	59,6 мбар	122 мбар
Максимальный дыхательный объем	0,3 л	0,5 л	0,7 л	0,9 л	1,1 л

Наибольшей пропускной способностью (по скорости потока жидкости) обладает нестандартная эндотрахеальная трубка с внутренним диаметром 12 мм, длиной 0,32 м со скоростью менее 5 м/с.

Потребляемое количество кислорода необходимое при жидкостном дыхании на метаболизм человека составляет 5,3%. Концентрация кислорода, подаваемого в легкие при жидкостном дыхании зависит от растворимости O_2 в ПФУ и эффективности работы оксигенатора. Как правило практическая концентрация кислорода лежит в пределах 10...40% и зависит от свойств ПФУ, условий (парциального давления, температуры) и конструкции оксигенатора. Удаление углекислого газа из легких при 5,3% концентрации CO_2 является лимитирующим фактором, при котором требуется пропустить через легкие человека больший объем ПФУ при удалении CO_2 , чем при насыщении O_2 . Изменить концентрацию углекислого газа в крови и альвеолярном пространстве легких больше 5...6% не представляется возможным аппаратом принудительного жидкостного дыхания. В этом случае дыхательный объем рассчитывается из расчета: **8...12 мл/кг** веса по углекислому газу, и **4...8 мл/кг** веса по кислороду. При введении ограничения по минутному балансу углекислого газа, дыхательный объем возрастает (таблица 6) до 1,0 л, а расход насоса на вдох до 24 л/мин., что приводит к увеличению скорости потока в эндотрахеальной трубке больше 5 м/с.

Испытания и исследования безопасных режимов принудительного жидкостного дыхания легких и аппарата ЖД были проведены, как на имитаторе легкого (результаты представлены на **Рис.4**), так и на биообъектах – собаках 1–4 (результаты представлены на **Рис.5-8**). На вышеуказанных рисунках приведены графики расхода и давления дыхательной жидкости цикла вдох/выдох. Качественные характеристики расхода на имитаторе легкого и легких биообъекта (собаки) отличаются на фазе выдох, а количественно по давлению на фазе вдох/выдох (**Рис.4,5**).

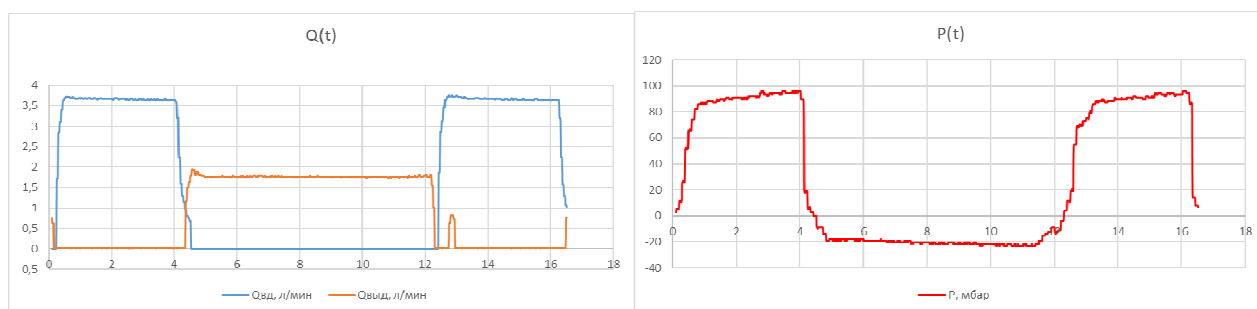


Рис.4 – Графики расхода и давления дыхательной жидкости в контуре вдох/выдох на имитаторе «искусственное легкое»

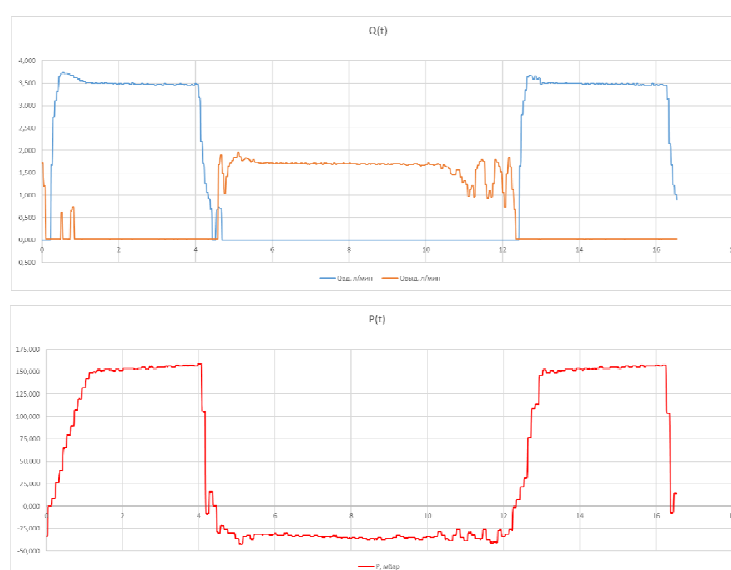


Рис.5 – Графики расхода и давления дыхательной жидкости в контуре вдох/выдох на биологическом объекте «легкие собаки 1»

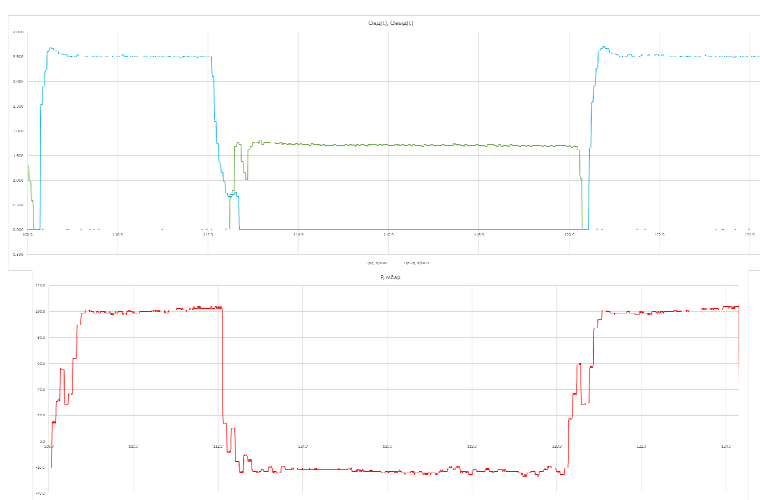


Рис.6 – Графики расхода и давления дыхательной жидкости в контуре вдох/выдох на биологическом объекте «легкие собаки 2»

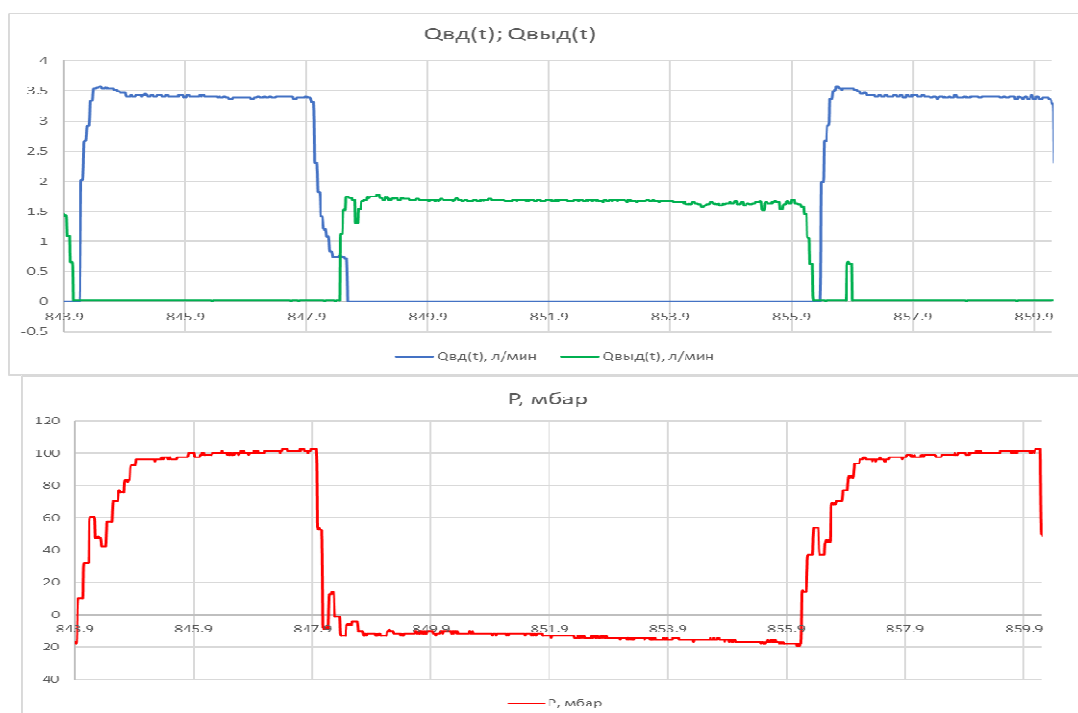


Рис.7 – Графики расхода и давления дыхательной жидкости в контуре вдоха/выдох на биологическом объекте «легкие собаки 3»

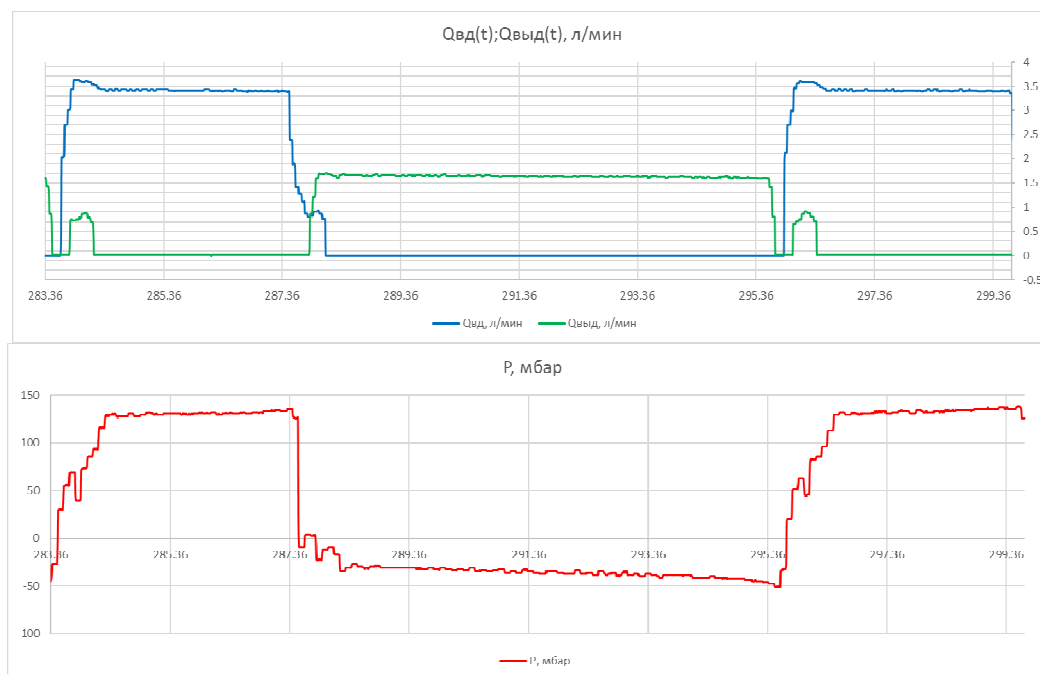


Рис.8 – Графики расхода и давления дыхательной жидкости в контуре вдоха/выдох на биологическом объекте «легкие собаки 4»

Анализ графических зависимостей на **Рис.5-8** показывает, что дыхательный объем цикла вдох/выдох на всех зависимостях для разных биообъектов практически одинаков, а давление ДЖ в начале эндотрахеальной трубки до легкого не превышает 150 мбар, что с учетом потерь давления и остаточного (газового) объема не приводит к баротравмам легкого и обеспечивает аппаратом безопасный режим цикла вдох/выдох.

В таблице 7 приведены показатели анализа газов крови испытуемых собак с помощью аппарата принудительного жидкостного дыхания. Показания парциального давления по O_2 и CO_2 венозной крови у испытуемых биообъектов делались до и после применения жидкостного аппарата (значения 1 и 6 для собак №1,2,3,4, таблица 7), а показания 2,3,4,5 соответствуют заборам крови (у собак №1,2,3,4, таблица 7) проводимых во время эксперимента с промежутком во времени 10 минут.

Таблица 7. Парциальные давления газов в венозной крови испытуемых собак

Газ крови	Собака №1						Собака №2					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
pH	7,37	7,39	7,38	7,44	7,28	7,36	7,36	7,43	7,38	7,34	7,36	7,30
O_2 , mmHg	49	36	39	48	52	42	33	31	36	36	56	45
pCO_2 , mmHg	38,6	38,7	39,5	26,5	43,2	40,4	47,9	31,0	37,6	45,9	38,0	41,2
Газ крови	Собака №3						Собака №4					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
pH	7,77	7,35	7,25	7,42	7,27	7,42	7,35	7,37	7,39	7,39	7,37	7,49
O_2 , mmHg	36	28	31	37	33	48	39	45	45	48	60	56
pCO_2 , mmHg	59,7	28,5	36,7	19,5	37,3	28,4	41,8	32,0	26,6	25,0	26,8	25,4

Как показывают результаты экспериментов на биообъектах, показания напряжения венозной крови до, во время и после экспериментов не значительно отличаются от показаний, представленных на физической модели (**Рис.3**). Аппарат принудительного жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром успешно выполнял свои функции по поддержанию дыхания испытуемых животных с длительностью работы 50 минут. Все испытуемые животные выжили и наблюдались 30 дней после экспериментов без отклонений основных показателей жизнедеятельности организма и поведения.

Выводы

1. Наличие в аппарате замкнутого дыхательного контура жидкостного дыхания позволило обеспечивать длительность процесса принудительного дыхания на биообъектах 10 часов и более.
2. Представлена физическая и математическая модели газообмена в легких человека и собаки при дыхании атмосферным воздухом и при жидкостном дыхании.
3. Определены и подобраны безопасные режимы работы аппарата с жидкостным дыханием для биообъекта – собака, которые обеспечивали высокую выживаемость.
4. Исходя из ограничения по удалению углекислого газа и скорости течения дыхательной жидкости по эндотрахеальной трубке дыхательный объем нужно рассчитывать из следующего соотношения объема жидкости на килограмм веса испытуемого биообъекта: **8...12 мл/кг**.
5. Исходя из приведенных выше графиков расхода и давления насосов вдоха/выдоха для качественной и безопасной работы легких биообъекта необходимо корректировать их режимы пуска и останова.

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет – 2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект №2 «Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания»).

Библиографический список

1. Moroz V.V. Endotrakheal'noye primeneniye perftorana v usloviyakh IVL u bol'nykh s ostrym respiratornym distress-sindromom / V.V. Moroz, D.A. Ostapchenko, A.V. Vlasenko, P.YU. Osipov, L.V. Gerasimov // Obshchaya reanimatologiya. – 2005. – С. 5–11.
2. Poptsov V.N. Pervyy klinicheskiy opyt ispol'zovaniya chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii na osnove endobronkhial'nogo vvedeniya perftorana v kompleksnoy terapii respiratornogo distress-sindroma / V.N. Poptsov, A.Ye. Balandyuk // Biomeditsinskiy zhurnal Medline.ru. – 2004. – Т.5. – S. 173–174.

3. Korepanov A.L. Zhidkostnoye dykhaniye. Chastichnaya zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh / A.L. Korepanov // Vestnik fizioterapii i kurortologii. – 2018. – T.24, № 2. – S. 62–70.
4. Sarkar S. Liquid ventilation / S. Sarkar, A. Paswan, S. Prakas // Anesth Essays Res. – 2014. – Vol.8, №3. – P. 277–282.
5. Возможно ли жидкостное дыхание у человека? [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://umka-mag.ru/vozmozhno-li-zhidkostnoe-dyhanie-u-cheloveka>
6. US20080295828A1 Artificial gills for deep diving without incurring the bends and for scavenging O2 from and dispelling CO2 into water or thin air.
7. Мишо П. Жидкостная вентиляция легких и метод индукции приливной жидкостной вентиляции и / или гипертермии / П. Мишо, Р. Тиссье, М. Надо, М. Кольхауэр, Дж. Вандамм, Дж. Муссо, Канада, L80011814WO, 12 апреля 2019 г.
8. Патент на полезную модель №215480. Аппарат жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром/ Поливцев В.П., Поливцев В.В., Пашков Е.В. заявл. 27.06.2022; опубл. 14.12.2022.
9. Поливцев В.П. Исследование процесса насыщения газом жидкости в замкнутом контуре аппарата жидкостного дыхания / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев, А.И. Балакин // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2023. – № 2(22). – С. 77-96.
10. Поливцев В.П. Исследование режимов жидкостной вентиляции легких в нормобарии с использованием аппарата с замкнутым дыхательным циклом / Балакин А.И. Поливцев В.В., Гарматюк М.И. // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2023. – №4(24). – С. 85-101.
11. Поливцев В.П., Поливцев В.В., Пашков Е.В., Калинин М.И. Патент на полезную модель Аппарат жидкостного дыхания. Регистрационный номер: RU 209 285 U1 от 14.03.2022.
12. Баринов В.А. Использование перфторуглеродных жидкостей в лечении респираторного дистресс-синдрома (обзор литературы) / Бонитенко Е.Ю., Беликов Н.А. и др. // MEDLINE.RU, Фармакология, 15 августа 2022. – с. 515-555.
13. Руководство по газам крови. Copyright© 2009 Radiometer Medical ApS, Дания. Отпечатано в Дании компанией Radiometer Medical ApS, 2700 Bronshøj, Denmark, 2010/ ISBN 87-88138-50-9, кат. 3989-463.201005F
14. Bendjelid K. Transcutaneous PCO2 monitoring in critically ill adults: clinical evaluation of a new sensor / K. Bendjelid, N. Schütz, M. Stotz, I. Gerard, P.M. Suter, J.A. Romand // Crit Care. – 2005. – Med.33 (10): 2203-6. doi:10.1097 /01.ccm.0000181734.26070.26. PMID 16215371.

15. Yildizdaş D. Ratio of gases simultaneously obtained in capillary, venous and arterial blood of patients in paediatric intensive care unit / D. Yildizdaş, H. Yapicioğlu, H.L. Yilmaz, Y. Sertdemir // Arch Disc Child. – 2004. – 89 (2): 176-180. doi:10.1136/adsc.2002.016261. PMC 1719810. PMID 14736638.
16. Шапиро Б.А. Температурная коррекция значений газов в крови / Б.А. Шапиро // Клиника дыхательной терапии в Нью-Йорке. 1995. – №1(1). – с. 69-76.
17. Умрюхин П.Е. Диффузия газов через жидкости. Механизмы диффузии газов через жидкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meduniver.com/Medical/Physiology/864.html>
18. Северингхаус Дж.У. (1998). Анализ газов в крови и реаниматология / Дж.У. Северингхаус, П. Аструп, Дж.Ф. Мюррей // Am J Respir Crit Care – 1998. – Med.157 (4Pt2). – pp. 114-122.
19. Транспорт веществ через биомембраны. Структура и свойства биологических мембран. Кинезиолог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kineziolog.su/content/transport-veshchestv-cherez-biomembranyysclid=lqkqzhcewc377309388>.
20. Частная физиология. Книга 3. Физиология собак и кошек ГАЗООБМЕН В ЛЕГКИХ И ТКАНЯХ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://bstudy.net/978570/agro/gazoobmen_legkih_tkanyahysclid=lr8wu8c8x3759366051

Bibliograficheskiy spisok

1. Moroz V.V. Endotrakheal'noye primeneniye perftorana v usloviyakh IVL u bol'nykh s ostrym respiratornym distress-sindromom / V.V. Moroz, D.A. Ostapchenko, A.V. Vlasenko, P.YU. Osipov, L.V. Gerasimov // Obshchaya reanimatologiya. – 2005. – С. 5–11.
2. Poptsov V.N. Pervyy klinicheskiy opyt ispol'zovaniya chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii na osnove endobronkhial'nogo vvedeniya perftorana v kompleksnoy terapii respiratornogo distress-sindroma / V.N. Poptsov, A.Ye. Balandyuk // Biomeditsinskiy zhurnal Medline.ru. – 2004. – T.5. – S. 173–174.
3. Korepanov A.L. Zhidkostnoye dykhaniye. Chastichnaya zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh / A.L. Korepanov // Vestnik fizioterapii i kurortologii. – 2018. – T.24, № 2. – S. 62–70.
4. Sarkar S. Liquid ventilation / S. Sarkar, A. Paswan, S. Prakas // Anesth Essays Res. – 2014. – Vol.8, №3. – P. 277–282.
5. Vozmozhno li zhidkostnoe dyhanie u cheloveka? [elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://umka-mag.ru/vozmozhno-li-zhidkostnoe-dyhanie-u-cheloveka>
6. US20080295828A1 Artificial gills for deep diving without incurring the bends and for scavenging O2 from and dispelling CO2 into water or thin air.

7. Misho P. ZHidkostnaya ventilyaciya legkih i metod indukcii prilivnoj zhidkostnoj ventilyacii i / ili gipertermii / P. Misho, R. Tiss'e, M. Nado, M. Kol'hauer, Dzh. Vandamm, Dzh. Musso, Kanada, L80011814WO, 12 aprelya 2019 g.
8. Patent na poleznuyu model' №215480. Apparat zhidkostnogo dyhaniya s zamknutym dyhatel'nym konturom/ Polivcev V.P, Polivcev V.V., Pashkov E.V. zayavl. 27.06.2022; opubl. 14.12.2022.
9. Polivcev V.P. Issledovanie processa nasyshcheniya gazom zhidkosti v zamknutom konture apparata zhidkostnogo dyhaniya / V.P. Polivcev, V.V. Polivcev, A.I. Balakin // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2023. – № 2(22). – S. 77-96.
10. Polivcev V.P. Issledovanie rezhimov zhidkostnoj ventilyacii legkih v normobarii s ispol'zovaniem apparata s zamknutym dyhatel'nym ciklom / Balakin A.I. Polivcev V.V., Garmatyuk M.I. // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2023. – №4(24). – S. 85-101.
11. Polivcev V.P., Polivcev V.V., Pashkov E.V., Kalinin M.I. Patent na poleznuyu model' Apparat zhidkostnogo dyhaniya. Registracionnyj nomer: RU 209 285 U1 ot 14.03.2022.
12. Barinov V.A. Ispol'zovanie perftoruglerodnyh zhidkostej v lechenii respiratornogo distress-sindroma (obzor literatury) / Bonitenko E.YU., Belikov N.A. i dr. // MEDLINE.RU, Farmakologiya, 15 avgusta 2022. – s. 515-555.
13. Rukovodstvo po gazam krovi. Copyright© 2009 Radiometer Medical ApS, Daniya. Otpechatano v Danii kompaniej Radiometer Medical ApS, 2700 Bronshoj, Denmark, 2010/ ISBN 87-88138-50-9, kat. 3989-463.201005F
14. Bendjelid K. Transcutaneous PCO2 monitoring in critically ill adults: clinical evaluation of a new sensor / K. Bendjelid, N. Schütz, M. Stotz, I. Gerard, P.M. Suter, J.A. Romand // Crit Care. – 2005. – Med.33 (10): 2203-6. doi:10.1097 /01.ccm.0000181734.26070.26. PMID 16215371.
15. Yildizdaş D. Ratio of gases simultaneously obtained in capillary, venous and arterial blood of patients in paediatric intensive care unit / D. Yildizdaş, H. Yapicioğlu, H.L. Yilmaz, Y. Sertdemir // Arch Disc Child. – 2004. – 89 (2): 176-180. doi:10.1136/adc.2002.016261. PMC 1719810. PMID 14736638.
16. SHapiro B.A. Temperaturnaya korrekciya znachenij gazov v krovi / B.A. SHapiro // Klinika dyhatel'noj terapii v N'yu-Jorke. – 1995. – №1(1). – s. 69-76.
17. Umryuhin P.E. Diffuziya gazov cherez zhidkosti. Mekhanizmy diffuzii gazov cherez zhidkosti [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://meduniver.com/Medical/Physiology/864.html>

18. Severinghaus Dzh.U. (1998). Analiz gazov v krovi i reanimatologiya / Dzh.U. Severinghaus, P. Astrup, Dzh.F. Myurrej // Am J Respir Crit Care – 1998. – Med.157 (4Pt2). – pp. 114-122.
19. Transport veshchestv cherez biomenbran6y. Struktura i svojstva biologicheskikh membran. Kineziolog [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://kineziolog.su/content/transport-veshchestv-cherez-biomembranyysclid=lqkqzhcewc377309388>.
20. CHastnaya fiziologiya. Kniga 3. Fiziologiya sobak i koshek GAZOOBMEN V LEGKIH I TKANYAH [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://bstudy.net/978570/agro/gazoobmen_legkih_tkanyahysclid=lr8wu8c8x3759366051

¹Поливцев Виктор Петрович, заведующий лабораторией, VPPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, AIBalakin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Поливцев Владимир Викторович, руководитель группы, VVPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Гарматюк Михаил Игоревич, инженер 1 категории, MIGarmatyuk@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁵Рошчупкин Станислав Иванович, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, siroshchupkin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

STUDY OF THE PROCESS OF GAS EXCHANGE IN THE LUNGS DURING LIQUID BREATHING USING A CLOSED BREATHING CIRCUIT APPARATUS

V.P. Polivtsev, A.I. Balakin, V.V. Polivtsev, M.I. Garmatyuk, S.I. Roshchupkin

A review of developed medical devices of liquid breathing with a closed breathing circuit is made. Research of liquid breathing technology for the apparatus with a closed breathing circuit is proposed. A scheme based on the method of ultrasonic gas removal, as well as a scheme of oxygenation (saturation) of the breathing fluid by barbotage is proposed. The flow and pressure characteristics of

the pumps of the inhalation and exhalation circuits are investigated. Safe operating modes of the apparatus are determined and calculations of respiratory volume per kg of bioobject weight are made. Physical models of gas exchange in the lungs of the bioobject under atmospheric and liquid breathing are presented. Graphs of operation of inhalation/exhalation circuits are given. The presented physical model of gas exchange in lungs under liquid breathing is validated by the results.

Keywords: liquid breathing, respiratory volume, respiratory fluid, endotracheal tube, closed breathing circuit, respiratory rate, dissolved oxygen concentration, oxygen concentration measurement, overpressure, absolute pressure.

Viktor Petrovich Polivtsev, head of the laboratory, VPPolivtsev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Balakin Alexey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, leading researcher, AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Polivtsev Vladimir Viktorovich, group leader, VVPolivtsev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Garmatyuk Mikhail Igorevich, engineer of 1 category, MIGarmatyuk@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Roshchupkin Stanislav Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, leading researcher, siroshchupkin@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МЕДИЦИНСКИЙ СТРОБОСКОП

Невар Г.В.¹, Чаленков Н.И.², Мирзоян Н.Ю.³

Аннотация. Рассматривается применение устройства на основе стробоскопического эффекта для оценки функционального состояния голосовых связок. Приводятся электрическая схема и осциллограмма работы разработанного устройства исследования голосовых связок в среде Proteus. Полученные результаты подтверждают работоспособность прибора.

Ключевые слова. Стробоскоп, голосовые связки, схема электрическая.

В настоящее время при изучении характера нарушения голоса используется стробоскопия, суть которой состоит в излучении прерывистых световых импульсов на связки, образуя так называемые вспышки. Вспышки помогают произвести фиксацию положения связок, когда на них попадают звуковые волны.

Данная диагностика голосовых связок считается одной из самых информативных методик. Благодаря ей исследуют функциональность гортани и голосового аппарата [1,2]: фиксация несинхронных движений связок; выявление низкого тонуса, несмыканий; оценка функциональных возможностей голосового механизма гортани; наглядное представление работы связок.

Целью стробоскопии, в отличие от других диагностических мероприятий, является оценка состояния связок в процессе работы, в то время как прочие методы лишь оценивают внешний вид голосовых связок или других органов и тканей в области гортани. В процессе стробоскопии проводится видеоэндоскопия, видео фиброларингоскопия, компьютерная акустическая диагностика голоса, аутофлюоресцентная эндоскопия.

Основные частоты людей находятся в пределах от 500 до 4000 Гц. Например, бас начинается обычно с 80 Гц, а сопрано определяется в 1300 Гц. Поэтому самые приятные для человека звуки – шум моря, леса – имеют частоту около 1000 Гц.

Целью статьи является разработка электрической схемы медицинского стробоскопа с частотой от 1 Гц до 400 Гц.

Разрабатываемый прибор предназначен для генерации импульсов прямоугольной формы частотой от 1 Гц до 4000 Гц со скважностью от 0 до 100%. В состав прибора входит светодиодный фонарь, который при необходимости генерирует световые импульсы, соответствующие выходному

сигналу прибора. Стробоскопический эффект достигается за счет низкой инертности свечения светодиода и вертикальных фронтов нарастания и убывания управляющего сигнала. За счет гибкого управления параметрами выходного сигнала, поступающего на светодиод, и особенностей инерции человеческого зрения, можно достичь визуальной остановки вибрации голосовых связок.

Принцип основан на включении светодиода на короткий промежуток времени, который как правило измеряется в миллисекундах, после которого наступает теневая пауза. Так как свечение светодиода – это очень короткий промежуток времени, то человеческому глазу кажется, что подсвечиваемый объект неподвижен. После чего наступает теневая пауза, в ходе которой объект делает один период своего движения, затем снова включается светодиод, и оператор видит то же самое положение объекта, что и в прошлую вспышку. Регулированием теневой паузы можно настроиться на любую частоту, с которой положение объекта меняется во времени. Результатом такой работы будет визуальный эффект, при котором вибрирующий объект будет неподвижен.

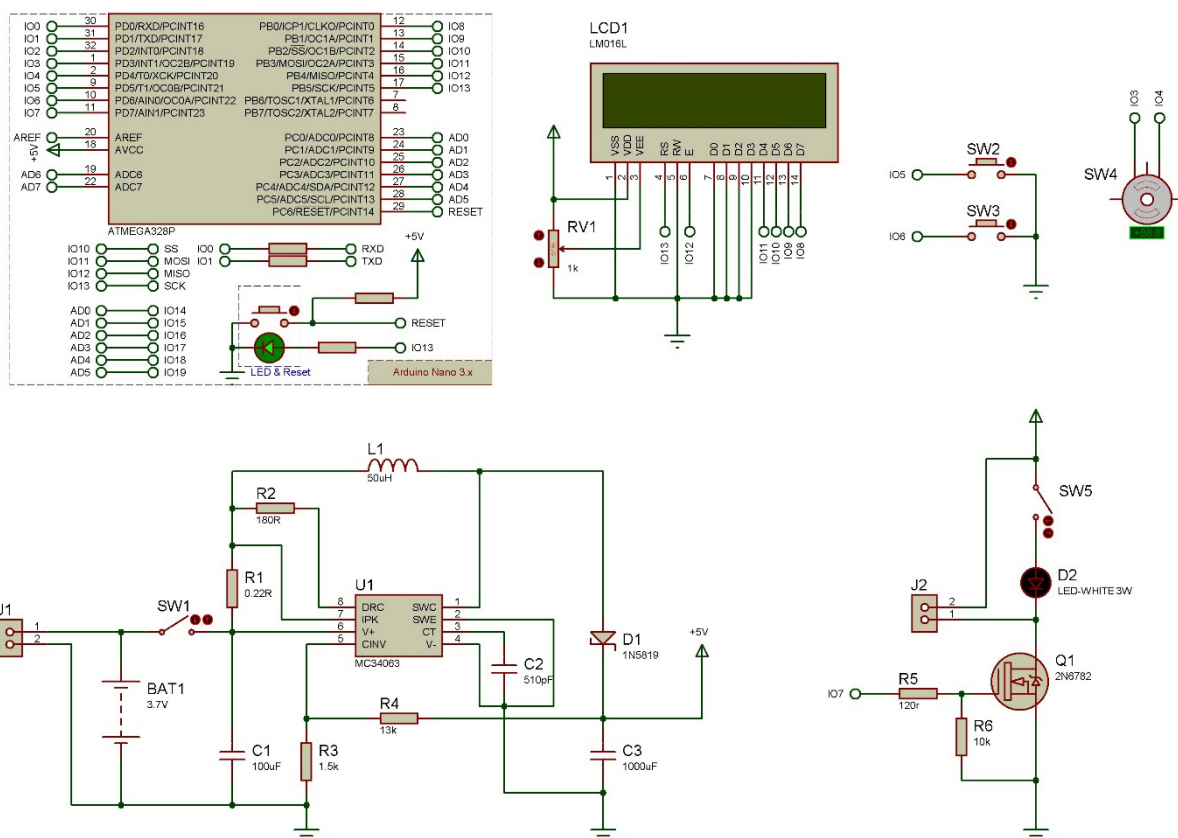


Рис.1 – Электрическая схема стробоскопа в среде Proteus

В качестве основного элемента системы выступает модуль Arduino nano. Он считывает показания с органов управления, в качестве которых выступают кнопки и механический энкодер, обрабатывает прерывания, выдает управляющий сигнал на силовой транзистор, а также передает информацию о параметрах сигнала на жидкокристаллический дисплей.

В состав системы входит:

- 1) Подсистема питания;
- 2) Подсистема обработки данных;
- 3) Подсистема управления;
- 4) Подсистема визуализации;
- 5) Подсистема выходных сигналов.

В качестве источника питания используется литий-ионной аккумуляторной батареи BAT1, типоразмера 18650 и повышающего DC-DC преобразователя U1, что позволяет сделать прибор портативным. Для включения устройства предназначен выключатель SW1. Выходное напряжение DC-DC преобразователя составляет +5V для подачи питания на модуль Arduino nano.

Модуль Arduino nano обрабатывает прерывания, которые поступают от кнопок управления SW2, SW3 и механического энкодера SW4, производит необходимые расчеты, передает информацию на жидкокристаллический дисплей, и переходит в режим управления силовым выходным транзистором.

Кнопки осуществляют навигацию по меню прибора, а также подтверждение установки выбранного параметра. Энкодер отвечает за инкремент и декремент значения выбранного параметра.

Подсистема визуализации состоит из модульного жидкокристаллического дисплея на базе контроллера HD44780. Такое решение позволяет в первую очередь добиться минимального количества используемых элементов, а также освободить микроконтроллер платы Arduino nano от постоянного управления отображением данных, как в случае с динамической индикацией и семисегментными индикаторами. Жидкокристаллический дисплей подключен по четырех проводной схеме, данные передаются посылками. Контроллер дисплея принимает данные от микроконтроллера платы Arduino nano и самостоятельно занимается их отображением на дисплее. Потенциометр RV1 служит для коррекции контраста жидкокристаллического дисплея LCD1.

Для создания стробоскопического эффекта используется силовой транзистор Q1, светодиод D2, а также разъем J2.

Транзистор Q1 он служит для управления силовой нагрузкой, в качестве которой может выступать светодиод D2, если прибор используется в качестве стробоскопа. В случае использования прибора в качестве генератора импульсов

выступает разъем J2. При использовании устройства в качестве генератора импульсов светодиод можно отключить выключателем SW5.

На Рис.2 приведена осциллограмма работы прибора.

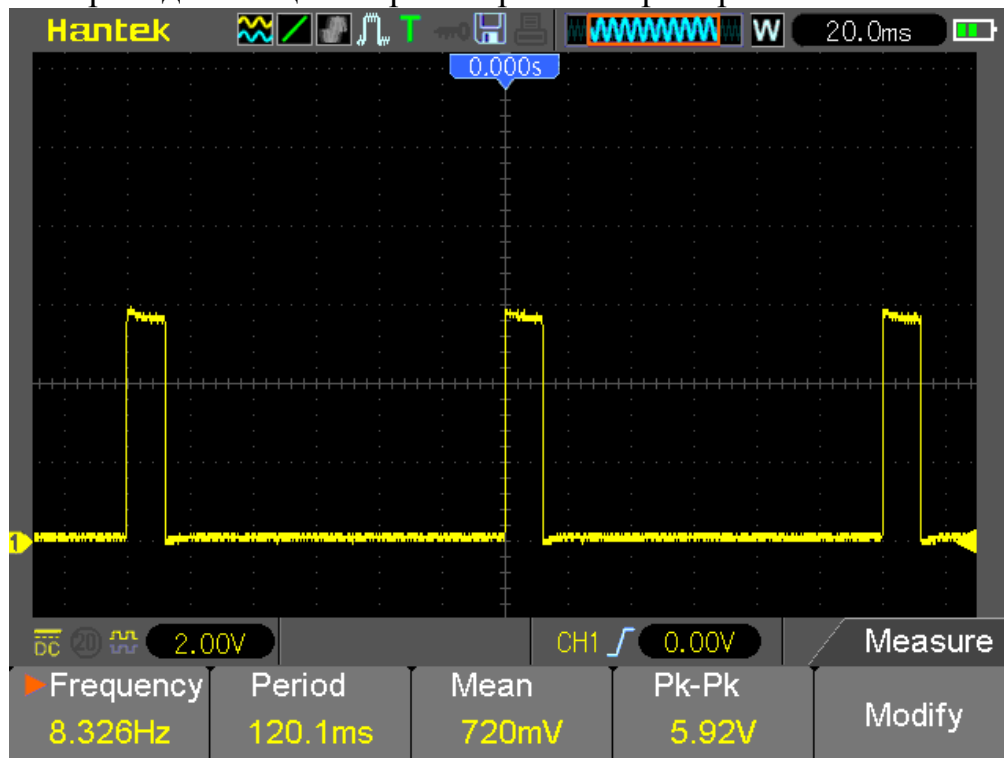


Рис.2 – Осциллограмма работы прибора

Как видно из осциллограммы, период импульсов составляет 120.1ms, который соответствует частоте 8.326Hz. Изменение частоты и скважности импульсов производится в меню прибора, что позволяет произвести необходимые настройки прибора для исследования голосовых связок.

Выводы:

1. В результате выполненной работы был разработан стробоскоп для исследования голосовых связок.
2. Применение устройства возможно в промышленности при исследовании движущих или вибрирующих объектов за счёт создания эффекта неподвижности.

Библиографический список

1. Авторское свидетельство № 47100 А1 СССР, МПК G10L 21/00. Стробоскоп для исследования голосового аппарата : № 183729 : заявл. 03.01.1936 : опубл. 31.05.1936 / И. И. Левидов.
2. Ремизова А.С. Предварительные результаты стробоскопии гортани у взрослых / А.С. Ремизова, С.А. Ульяновская, А.В. Виноградова //

Актуальные вопросы фундаментальной и клинической морфологии: Материалы Международной научно-практической конференции, приуроченной к 80-летию член-корреспондента РАН, доктора медицинских наук, профессора Дмитрия Васильевича Баженова (14 октября 2022 год). – Тверь: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Тверская государственная медицинская академия Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2022. – С. 410-414.

3. Ремизова А.С. Исследование клинко-морфологических особенностей гортани человека при стробоскопии / А.С. Ремизова // Неделя молодежной науки - 2023 : материалы Всероссийского научного форума с международным участием, посвященного 60-летию со дня образования Тюменского государственного медицинского университета (23–25 марта 2023 год). – Тюмень: РИЦ «Айвекс», 2023. – С. 503-504.
4. Степанова Ю. Е. Применение видеостробоскопии для диагностики, лечения функциональных и органических заболеваний гортани: Пособие для врачей / Ю.Е. Степанова, Н.В. Швалев. – СПб. – 2000. – 19 с
5. Зеленкин Е.М. Электрларингостробоскопия и индекс вибраторной недостаточности в диагностике нарушений голоса / Е.М. Зеленкин, И.Ю. Герасимова, Н.В. Мингалева, О.С. Орлова // Российская оториноларингология. – 2009. – № 5(42). – С. 60-62.

Bibliograficheskij spisok

1. Avtorskoe svidetel'stvo № 47100 A1 SSSR, MPK G10L 21/00. Stroboskop dlya issledovaniya golosovogo apparata : № 183729 : zayavl. 03.01.1936 : opubl. 31.05.1936 / I. I. Levidov.
2. Remizova A.S. Predvaritel'nye rezul'taty stroboskopii gortani u vzroslyh / A.S. Remizova, S.A. Ul'yanovskaya, A.V. Vinogradova // Aktual'nye voprosy fundamental'noj i klinicheskoy morfologii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoj k 80-letiyu chlen-korrespondenta RAN, doktora medicinskih nauk, professora Dmitriya Vasil'evicha Bazhenova (14 oktyabrya 2022 god). – Tver': Gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Tverskaya gosudarstvennaya medicinskaya akademiya Ministerstva zdavooohraneniya Rossijskoj Federacii, 2022. – S. 410-414.
3. Remizova A.S. Issledovanie kliniko-morfologicheskikh osobennostej gortani cheloveka pri stroboskopii / A.S. Remizova // Nedelya molodezhnoj nauki - 2023 : materialy Vserossijskogo nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennogo 60-letiyu so dnya obrazovaniya Tyumenskogo

gosudarstvennogo medicinskogo universiteta (23–25 marta 2023 god). – Tyumen': RIC «Ajveks», 2023. – S. 503-504.

4. Stepanova YU. E. Primenenie videostroboskopii dlya diagnostiki, lecheniya funkcional'nyh i organicheskikh zabolevanij gortani: Posobie dlya vrachej / YU.E. Stepanova, N.V. SHvalev. – SPb. – 2000. – 19 s
5. Zelenkin E.M. Elektrolaringostroboskopiya i indeks vibratornoj nedostatochnosti v diagnostike narushenij golosa / E.M. Zelenkin, I.YU. Gerasimova, N.V. Mingalev, O.S. Orlova // Rossijskaya otorinolaringologiya. – 2009. – № 5(42). – S. 60-62.

¹Невар Галина Валерьевна, ассистент, GVNevar@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Чаленков Никита Игоревич, ассистент, chalenkov-nikita@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, NYMirzoyan@sevsu.mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

MEDICAL STROBOSCOPE

G.V. Nevar, N.I. Chalenkov, N.Y. Mirzoyan

The use of a device based on the stroboscopic effect to assess the functional state of the vocal cords is considered. An electrical circuit and an oscillogram of the operation of the developed device for studying the vocal cords in the Proteus environment are presented. The results obtained confirm the performance of the device.

Key words: strobe, vocal cords, electrical circuit.

Nevar Galina Valerievna, assistant, GVNevar@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Chalenkov Nikita Igorevich, assistant, chalenkov-nikita@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Mirzoyan Natalia Yurievna, assistant, NYMirzoyan@sevsu.mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №1(25) 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

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: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 25.03.2024. Заказ 3/2024. Дата выхода в свет: 30 . 04 .2024. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,49.

Севастополь, 2024