

УДК 004.896:629.78.007

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ УГЛОВ ПОВОРОТА РЫЧАГА УПРАВЛЕНИЯ БОРТОВОЙ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

А.Е. Белявский, А.Ю. Кикина, А.В. Федяев, А.В. Иванова

Докт. техн. наук, доц. А.Е. Белявский; А.В. Иванова (МАИ)  
Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации  
А.Ю. Кикина; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации  
А.В. Федяев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлен алгоритм повышения точности позиционирования углов поворота рычага управления бортовой антропоморфной робототехнической системой (АРТС). Суть алгоритма заключается в проведении наземных экспериментов для установления аппроксимирующей зависимости между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в задающем устройстве копирующего типа (ЗУКТ), и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. Проведен наземный эксперимент, в результате которого построены аппроксимирующие полиномиальные регрессии для трех участников эксперимента.

**Ключевые слова:** антропоморфная робототехническая система, полиномиальная регрессия, нормальное распределение, базовая целевая операция, наземный эксперимент

### Development of an Algorithm for Increasing the Accuracy of Positioning the Rotation Angles of the Control Lever of the Onboard Anthropomorphic Robotic System. A.E. Belyavsky, A.Yu. Kikina, A.V. Fedyaev, A.V. Ivanova

The paper presents an algorithm for improving the accuracy of positioning the rotation angles of the control lever of an onboard anthropomorphic robotic system (ARS). The essence of the algorithm is to conduct ground-based experiments to establish an approximating relationship between the parameters set by the hand of the cosmonaut operator in the master device of the copying type and the parameters obtained as a result of operation by the on-board ARS's lever. A ground experiment resulted in making the approximating polynomial regressions were constructed for three participants of the experiment.

**Keywords:** anthropomorphic robotic system, polynomial regression, normal distribution, basic target operation, ground experiment

Развитие космической робототехники в интересах создания и использования бортовых АРТС в перспективных пилотируемых космических полетах (ППКП) для совместной работы с космонавтами обусловлено планируемым развертыванием долговременной Российской орбитальной станции (РОС),

разработкой пилотируемого транспортного корабля (ПТК-НП) и лунной исследовательской программой в соответствии с целями и задачами, изложенными в «Стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.» [1].

Бортовая АРТС – комплексная система, включающая автоматического человекоподобного робота с антропоморфными действиями и инфраструктуру управления им через человекомашинный интерфейс, предназначенная для поддержки деятельности космонавтов (в частности, при управлении другим бортовым оборудованием, научной аппаратурой) и для замещения деятельности космонавтов (особенно актуально для орбитальных космических станций посещения, в перспективе – для напланетных баз) [2, 3].

Одним из вариантов управления бортовой АРТС является управление в интерактивном «копирующем» режиме космонавтом, находящимся на борту станции, с помощью ЗУКТ с отображением обратной связи по усилию и с модулем визуализации [4, 5]. Копирующее управление манипуляторами АРТС имеет ряд проблем, главной из которых является недостаточная точность выполнения целевых операций [6, 7]. Проблема возникает по ряду причин, среди которых можно выделить: отличие антропометрических параметров руки оператора, ЗУКТ и манипулятора АРТС; несовпадение осей кинематических пар ЗУКТ и осей суставов руки оператора; копирование углов поворота рычажной системы ЗУКТ вместо углов поворота руки оператора и другие [8, 9].

С учетом изложенного, актуальной задачей копирующего управления манипуляторами АРТС является повышение точности выполнения целевых операций, что достигается за счет осуществления копирования не углов поворота рычажной системы ЗУКТ, а специально введенных искусственных параметров, рассчитываемых на основе аппроксимирующей зависимости между параметрами, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и устанавливаемыми манипулятором АРТС.

Суть данного подхода заключается в проведении наземных экспериментов для установления аппроксимирующей зависимости между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. Для каждой базовой целевой операции разрабатывается алгоритм повышения точности. С помощью полученной математической модели предлагается введение и пересчет искусственных параметров, передаваемых через программный модуль на персональном компьютере (ПК) оператора к бортовой АРТС, что позволяет повысить точность выполнения базовой целевой операции. Последовательное применение алгоритмов повышения точности базовых целевых операций бортовой АРТС при управлении с использованием ЗУКТ, позволяет повысить точность позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС.

Одной из базовых целевых операций является операция попадания рукой бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота.

Проведенные экспериментальные исследования на базе лаборатории робототехники в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» по копированию бортовой АРТС движений оператора в ЗУКТ по установке угла рычага управляющего устройства на рабочих плоскостях выявили значительные рассогласования углов (рис. 1). Левая прямая на рисунке моделирует рассогласование угла отклонения оператора, точки синего цвета изображают углы, отработанные рукой оператора в ЗУКТ; правая прямая моделирует рассогласование угла отклонения бортовой АРТС с точками красного цвета, отработанные рукой бортовой АРТС в копирующем режиме работы. Видно, что рассогласования в координатах некоторых точек достигают 5–7°. Целевая операция попадания рукой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота обуславливает точность выполнения других сложных манипуляций антропоморфного комплекса.

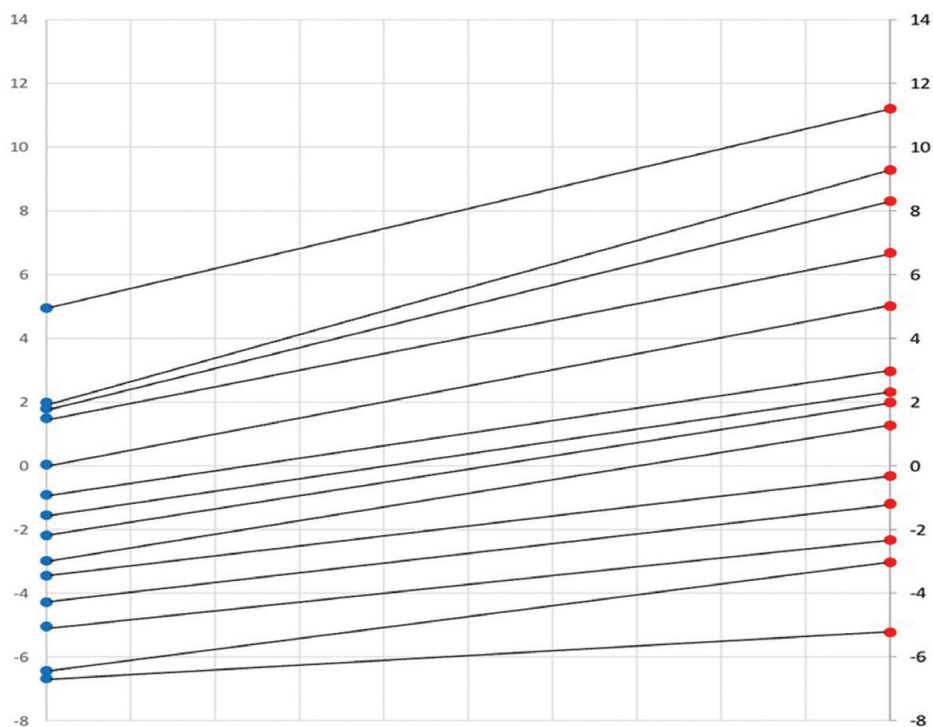


Рис. 1. График соответствия между отклонениями оператора (синий) и отклонениями АРТС (красный)

В результате проведенного экспериментального исследования получены данные, позволяющие записать регрессионные зависимости угла отклонения управляющего устройства оператора от угла отклонения управляющего устройства бортового АРТС для восьми горизонтальных направлений отклонения устройства для трех операторов.

Для математической формализации задачи построения регрессии и выбора статистической метрики для оценки ее точности вводятся следующие переменные:  $x$  – фактическое значение угла отклонения рычага управления у бортовой АРТС от заданного;  $y$  – фактическое значение угла отклонения рычага управления у оператора;  $\hat{y}(x)$  – зависимость предсказанного регрессионной моделью значения отклонения робота от фактического отклонения человека;  $\bar{y} = (\bar{y}_1 \dots \bar{y}_n)^T$  – вектор среднего значения выходного вектора  $Y$ .

В результате проведения  $n$  экспериментов получено множество измерений  $x(i), y(i); i = 1 \dots n$ .

Тогда для оценки того, насколько регрессия хорошо представляет данные, используется статистическая метрика – скорректированный коэффициент  $R^2$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}.$$

Этот показатель равен единице минус доля необъясненной дисперсии (или дисперсии случайной ошибки в модели регрессии) в дисперсии зависимой переменной. Он является универсальным показателем, характеризующим качество построенной регрессионной модели, с его помощью можно определить уровень точности прогноза. Чем меньше дисперсия случайной ошибки в модели регрессии, тем ближе значение  $R^2$  к единице и выше точность аппроксимации.

Для ракетно-космических систем принято разделять модели на три группы, в соответствии с уровнем качества регрессии, по показателю  $R^2$  (табл. 1).

Таблица 1

#### Уровни качества регрессии

Уровень качества модели	Показатель регрессии, $R^2$
хороший	0,8–1
приемлемый	0,6–0,8
плохой	0–0,6

В последнем случае качество модели говорит о невозможности ее использования для прогноза.

В нашей задаче требуется построение регрессии, связывающей координаты экспериментальных точек на плоскостях АРТС и оператора, с точностью прогноза по значению скорректированного коэффициента  $R^2 \geq 0,8$ .

После построения регрессий для каждого космонавта-оператора можно оценить угол поворота рычага управляющего устройства оператора по

требуемому значению угла поворота рычага устройства, управляемого АРТС. Для этого разработан программный модуль «Определение угла» на языке программирования Матлаб.

### Алгоритм повышения точности целевой операции

Алгоритм повышения точности целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота состоит из трех этапов, показанных на схеме (рис. 2). Рассмотрим подробнее содержание этапов.

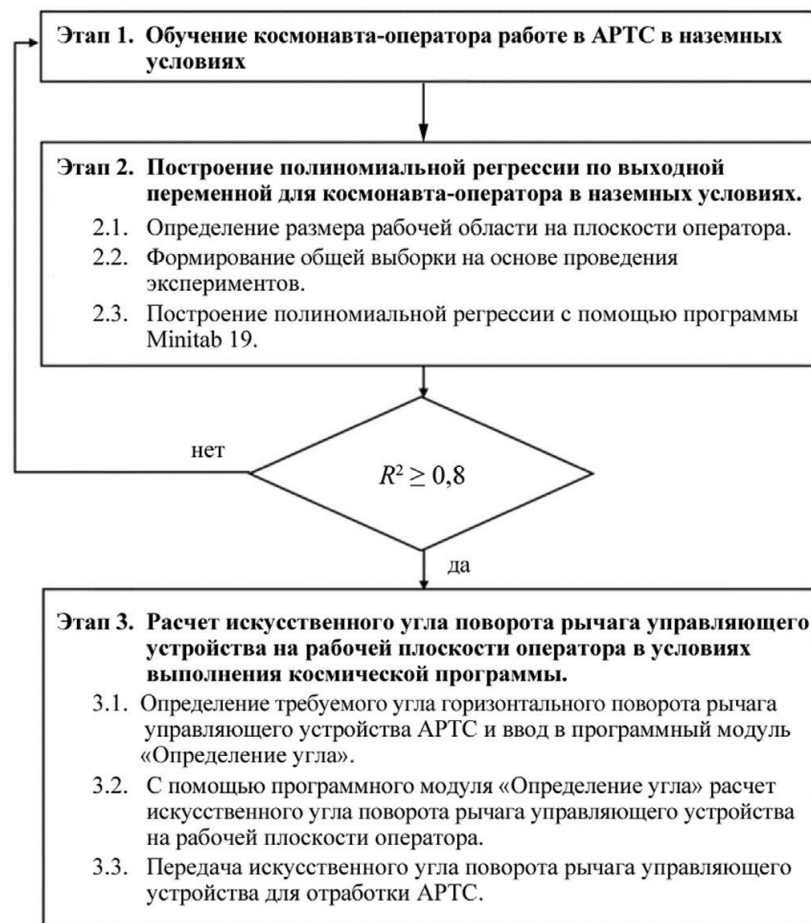


Рис. 2. Схема алгоритма повышения точности целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота

На первом этапе в наземных условиях проводится обучение космонавта-оператора работе в ЗУКТ в АРТС. В случае отсутствия в этом необходимости первый этап может быть пропущен.

На втором этапе, также осуществляемом в наземных условиях, проводится серия экспериментов по позиционированию углов поворота рычага управляющего устройства оператором и АРТС для формирования выборки. Экспериментальные горизонтальные углы рычага рекомендуется выбирать с учетом равномерного покрытия ими предполагаемой рабочей области космонавта-оператора. На подэтапе 2.3 на основе выборки проводится построение полиномиальной регрессии с помощью программы Minitab 19.

В случае, если требуемая точность по критерию  $R^2 \geq 0,8$  не удовлетворяется, проводится возврат к первому этапу для дополнительного обучения оператора. Если требуемая точность достигается, то на этом работы, выполняемые в наземных условиях, закончены.

Третий этап относится к работам, проводимым в условиях выполнения космической программы. После выбора космонавтом-оператором требуемого угла горизонтального поворота рычага управляющего устройства бортовой АРТС, этот угол передается на ПК в программный модуль «Определение угла».

В этом модуле на основе хранимой информации о полиномиальной регрессии, построенной для конкретного космонавта-оператора, проводится расчет искусственного угла поворота рычага управляющего устройства на рабочей плоскости оператора. Затем искусственный угол поворота рычага управляющего устройства на рабочей плоскости оператора передается для отработки бортовой АРТС. Вся операция по позиционированию угла поворота рычага управляющего устройства проводится в реальном масштабе времени, так как программный модуль «Определение угла» обладает высоким быстродействием.

### **Выбор метода оценки параметров распределения рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС**

Эксперимент с антропоморфным роботом, управляемым с помощью ЗУКТ, направлен на изучение взаимодействия между оператором и роботом. Перед оператором поставлена задача отклонить рычаг управляющего устройства на рабочей плоскости (джойстик) на  $20^\circ$  по вертикали с изменением угла в горизонтальной плоскости с шагом  $45^\circ$ . Задача бортовой АРТС заключается в попадании рукой робота рычага управляющего устройства в заданный угол поворота. В процессе эксперимента фиксировались отклонения робота по оси, перпендикулярной направлению, в котором двигался джойстик. На основании предварительных исследований выдвинута гипотеза, что отклонения джойстика от заданного угла при работе оператора и бортовой АРТС подчиняются нормальному распределению. Построение регрессионных моделей для описания зависимости между действиями оператора и отклонениями бортовой АРТС также связано с нормальным распределением данных.

Нормальное распределение описывается двумя параметрами: математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением.

Из возможных методов оценки математического ожидания на основе экспериментальных данных выбираем простую оценку Диксона, так как она оказывается предпочтительной в ситуациях, когда данные содержат выбросы или экстремальные значения [10].

Из возможных методов оценки среднеквадратического отклонения выбираем оценку среднеквадратического отклонения с помощью выборочного размаха, поскольку она дает простую, но при этом достаточно надежную оценку разброса данных, особенно в ситуациях, когда данные могут быть искажены выбросами или когда выборка ограничена.

### **Определение вида распределения данных, полученных в результате проведения эксперимента**

Вид распределения данных – это важный аспект статистического анализа, который определяет, какие методы и подходы можно использовать для анализа выборки. Нормальное распределение играет ключевую роль в классической статистике благодаря его математическим свойствам и простоте применения. Однако прежде чем использовать модели, основанные на предположении нормальности, необходимо проверить, насколько данные действительно соответствуют нормальному распределению. Для этого применяются различные критерии проверки нормальности распределения [11].

В рамках проводимого эксперимента важно убедиться, что данные, собранные по оси, перпендикулярной оси отклонения, распределены по нормальному закону. Это даст нам возможность корректно использовать линейные модели и другие методы, предполагающие нормальность распределения данных. В данном случае критерий Колмогорова – Смирнова оказывается одним из наиболее подходящих инструментов для проверки нормальности распределения.

### **Выбор метода построения аппроксимирующей полиномиальной регрессии**

Задачей эксперимента является построение полиномиальной регрессии, аппроксимирующей зависимость между параметрами, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. Для построения регрессии выбирается метод оценки параметров модели.

Из возможных методов аппроксимации наборов данных выбираем метод наименьших квадратов (МНК) [12], так как:

1. МНК минимизирует сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми значениями и аппроксимирующей функцией.

2. МНК является оптимальным методом, при условии, что шум (ошибки в данных) имеет нормальное распределение.

3. МНК прост в реализации и использует линейные уравнения, что делает его вычислительно эффективным.

4. В отличие от методов, которые точно интерполируют все данные (например полиномиальная интерполяция), МНК обеспечивает гладкую аппроксимацию, игнорируя случайные выбросы.

5. МНК может применяться к различным типам моделей:

– линейная регрессия: МНК используется для нахождения прямой, которая лучше всего приближает данные;

– полиномиальная аппроксимация: можно использовать полиномы любой степени для минимизации ошибок;

– экспоненциальные и логарифмические модели: метод также применим к моделям нелинейной зависимости.

6. МНК хорошо работает даже в условиях случайного шума в данных. В то время как методы интерполяции могут быть чувствительны к небольшим изменениям в данных, МНК минимизирует влияние каждого отдельного выброса.

## Построение полиномиальной регрессии

Задача состоит в построении аппроксимирующих зависимостей между углом отклонения управляющего устройства, устанавливаемым рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углом отклонения управляющего устройства, получаемым в результате работы рукой бортовой АРТС.

В результате эксперимента получен массив данных по углам отклонения управляющего устройства, устанавливаемым рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углам отклонения управляющего устройства, получаемым в результате работы рукой бортовой АРТС. Построение регрессии рассмотрим на примере эксперимента с одним горизонтальным направлением поворота управляющего устройства.

Следующим этапом являлась проверка выборки углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых оператором и АРТС на нормальность с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. Проверка проводилась при помощи программы Minitab 19. На рис. 3 представлена графическая интерпретация проверки на нормальность углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых оператором. На рис. 4 – аналогичная информация для углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых АРТС. На основании проверки сделан вывод, что выборки подчиняются законам нормального распределения.

Следующим шагом являлось определение параметров нормального распределения. На рис. 5 представлены функции распределения вероятности для оператора: красным цветом изображена функция нормального распределения с вычисленными параметрами, синим – функция распределения, построенная на экспериментальных данных.



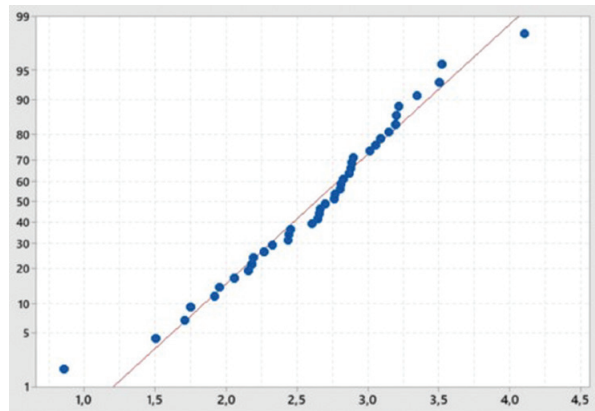


Рис. 3. Графическая интерпретация проверки на нормальность углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых оператором

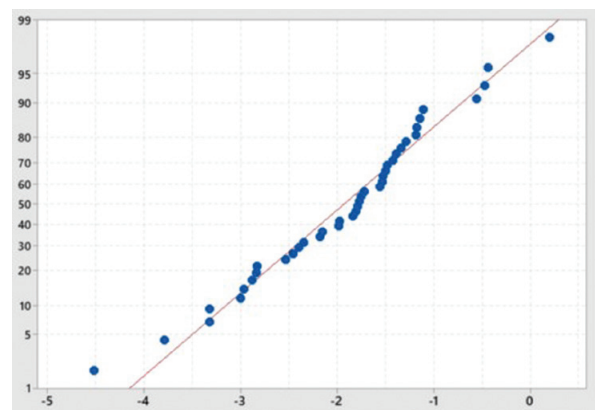


Рис. 4. Графическая интерпретация проверки на нормальность углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых АРТС

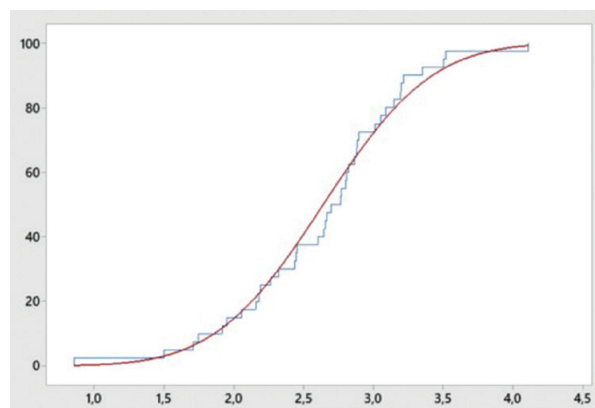


Рис. 5. Функции распределения вероятности для оператора

На рис. 6 представлены функции распределения вероятности для АРТС: красным цветом изображена функция нормального распределения с вычисленными параметрами, синим – функция распределения, построенная на экспериментальных данных.

На рис. 7 представлена гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых оператором. На рис. 8 представлена гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых АРТС.

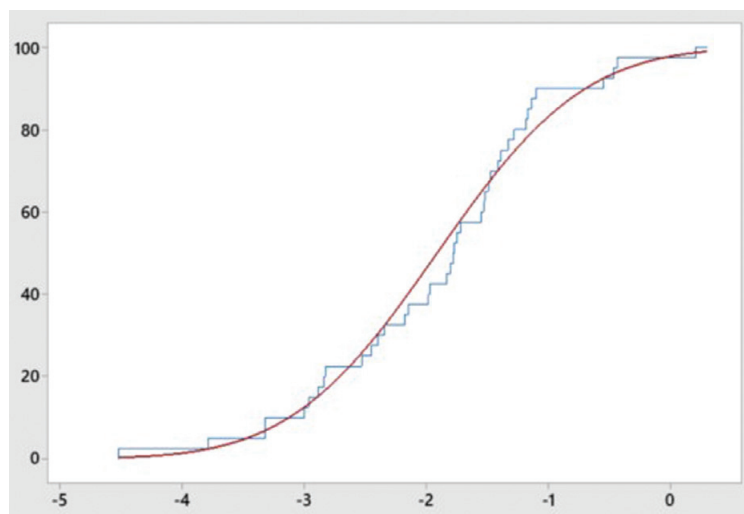


Рис. 6. Функции распределения вероятности для АРТС

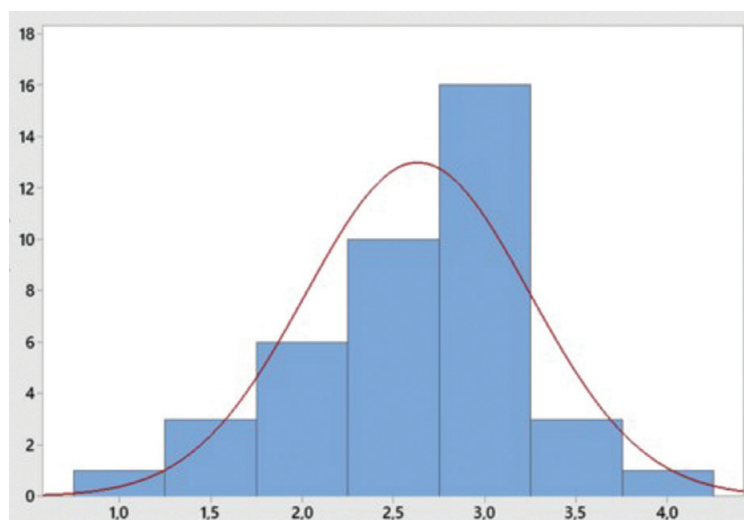


Рис. 7. Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых оператором

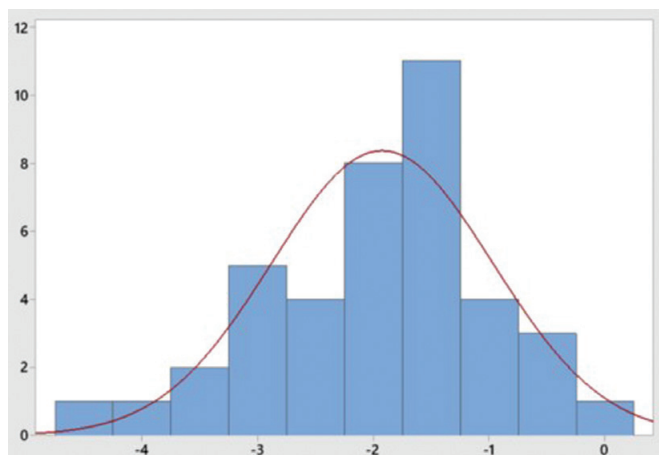


Рис. 8. Гистограмма и график плотности вероятности углов отклонения управляющего устройства, устанавливаемых АРТС

Следующим шагом являлось построение полиномиальной регрессии с помощью программы Minitab 19. В ходе эксперимента получены восемь регрессионных зависимостей угла отклонения управляющего устройства оператора от угла отклонения управляющего устройства АРТС для восьми горизонтальных направлений отклонения устройств. Для каждой регрессии подсчитан уровень качества по показателю  $R^2$ . Данные, по А.Ю. Кикиной, представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Регрессионные зависимости

Оператор	Угол отклонения, °	Регрессии	$R^2$
А.Ю. Кикина	0	$y = 4,249 + 1,371x + 0,009106x^2 - 0,003472x^3$	97,97
	45	$y = 3,198 + 0,2928x + 0,001794x^2 - 0,000165x^3$	97,65
	90	$y = -0,2653 + 1,025x + 0,006412x^2 - 0,004823x^3$	97,49
	135	$y = -0,1941 + 0,5794x + 0,01124x^2 - 0,001044x^3$	96,04
	180	$y = 0,4147 + 0,4711x + 0,1387x^2 - 0,02526x^3$	96,39
	225	$y = 15,09 + 3,068x + 0,033x^2 - 0,00273x^3$	96,77
	270	$y = 0,2729 + 1,23x + 0,08475x^2 - 0,005328x^3$	97,27
	315	$y = -3,49 + 0,7538x + 0,000831x^2 - 0,000767x^3$	97,57

В результате проведенного экспериментального исследования получены регрессионные зависимости угла отклонения управляющего устройства оператора от угла отклонения управляющего устройства бортовой АРТС для восьми горизонтальных направлений отклонения устройства для трех операторов, описанных в предыдущем разделе. Представленные данные

демонстрируют изменение уровня качества регрессии в зависимости от горизонтального угла поворота управляющего устройства, что связано с анатомическими характеристиками человека-оператора.

## **Выводы**

Экспериментальные исследования работы с бортовой АРТС выявили наличие значительного рассогласования угла горизонтального поворота рычага управляющего устройства оператора, облаченного в ЗУКТ, и АРТС в копирующем режиме управления.

Для повышения точности базовой целевой операции по установке угла рычага управляющего устройства на рабочих плоскостях предложена разработка математического и программного обеспечения для определения искусственных параметров, рассчитываемых на основе углов поворота руки оператора при копирующем управлении с использованием ЗУКТ. Разработан алгоритм повышения точности базовой целевой операции попадания манипулятором бортовой АРТС рычага управляющего устройства в заданный угол поворота, основанный на установлении аппроксимирующей зависимости между углами отклонения управляющего устройства, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углами отклонения управляющего устройства, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. С помощью полученной математической модели предлагается введение и пересчет искусственных углов задающего устройства, передаваемых через программный модуль на ПК оператора к бортовой АРТС, что позволяет повысить точность выполнения базовой целевой операции.

Проведен анализ и выбраны методы оценки параметров распределения рассогласования движений космонавта-оператора и бортовой АРТС при задаче угла поворота рычага управляющего устройства: простая оценка Диксона и с помощью выборочного размаха.

Проведен анализ и выбран метод оценки распределения экспериментальных данных по рассогласованию движений космонавта-оператора и бортовой АРТС – критерий Колмогорова – Смирнова.

На основе анализа выбран метод наименьших квадратов для построения аппроксимирующей полиномиальной регрессии, описывающей зависимость между углами поворота рычага управляющего устройства оператора посредством ЗУКТ и углами поворота рычага управляющего устройства бортовой АРТС.

Построены полиномиальные регрессии, аппроксимирующие зависимости между углами отклонения, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углами отклонения, получаемыми в результате работы рукой бортовой АРТС. В результате применения алгоритма обеспечивается выполнение целевой операции попадания рукой бортовой АРТС рычага управляемого устройства в заданный угол поворота с точностью не менее 90 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дикарев, В.А. Разработка элементов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов / В.А. Дикарев, Ю.С. Чеботарев // Идеи и Новации. – 2022. – № 1–2, Т. 10. – С. 99–103.
2. Сычков, В.Б. Методы и алгоритмы обработки информации для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота: дис. кандидата технических наук. Ставрополь, 2019. – 155 с.
3. Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 4(45). – С. 54–71.
4. Сорокин, В.Г. Этапы информационного взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом космического назначения в копирующем режиме / В.Г. Сорокин, Е.А. Дудоров // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 2(39). – С. 78–96.
5. Ермишин, К.В. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники / К.В. Ермишин, К.А. Ющенко / Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3(12). – С. 3–9.
6. О создании комплексного стенда-тренажера робототехнических систем для решения научно-прикладных задач на Российской орбитальной станции / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2024. – № 2(51). – С. 47–62.
7. Экспериментальные исследования вестибулярной устойчивости космонавтов при управлении робототехническими системами в виртуальной среде: постановка, проведение, результаты / В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 3(48). – С. 5–20.
8. О возможности отработки коллаборативного использования антропоморфной и манипуляционной робототехнической системы для операционной поддержки внекорабельной деятельности космонавтов / В.А. Дикарев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев, Э.В. Никитов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 3(44). – С. 69–84.
9. Предпосылки и результаты модернизации универсального компьютерного стенда робототехнических систем / В.А. Дикарев, В.А. Довженко, Э.В. Никитов, Ю.С. Чеботарев // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 4(41). – С. 36–47.
10. Мелас, В.Б. Численное сравнение перестановочных и классических методов проверки статистических гипотез / В.Б. Мелас, Д.И. Сальников, А.О. Гудулина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 415–423.
11. Колмогоров, А.Н. К вопросу о пригодности найденных статистическим путем формул прогноза // Журнал геофизики. – 2003. – Т. 3, № 1. – С. 78–82.
12. Колмогоров, А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Сб. статей. – Москва: Наука, 1986. – 535 с.

## REFERENCES

1. Dikarev, V.A. Development of elements of collaborative interaction between cosmonauts and robotic systems for manned space flights / V.A. Dikarev, Yu.S. Chebotarev // Ideas and Innovations. – 2022. – Vol. 10, No 1–2. – P. 99–103.
2. Sychkov, V.B. Methods and algorithms for processing information to improve the accuracy of performing target operations in copying control of manipulators of an anthropomorphic robot: thesis of candidate of technical sciences. Stavropol, 2019. – 155 p.
3. The problem of ensuring the conformity between kinematic characteristics of executive devices and master controllers of humanoid robotic systems for future manned space programs / V.A. Dikarev, A.N. Simbayev, A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev [et al.] // Manned Spaceflight. – 2022. – No 4(45). – P. 54–71.
4. Sorokin, V.G. Phases of information interaction of a cosmonaut with a space humanoid robot in a master-slave mode / V.G. Sorokin, Ye.A. Dudorov // Manned Spaceflight. – 2021. – No 2(39). – P. 78–96.
5. Yermishin, K.V. Collaborative mobile robots – a new stage in the development of service robotics / K.V. Yermishin, K.A. Yushchenko // Robotics and technical cybernetics. – 2016. – No 3(12). – P. 3–9.
6. On the creation of an integration simulator stand of robotic systems for implementing scientific and applied tasks onboard the russian orbital station / V.A. Dikarev, A.N. Simbayev, A.Yu. Kikina, D.A. Petelin [et al.] // Manned Spaceflight. – 2024. – No 2(51). – P. 47–62.
7. Experimental studies of cosmonauts' vestibular stability when controlling robotic systems in a virtual environment: formulation, implementation, results / V.A. Dikarev, A.N. Simbayev, A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev [et al.] // Manned Spaceflight. – 2023. – No 3(48). – P. 5–20.
8. The possibility of maturing the collaborative use of the anthropomorphic robotic system and manipulation robotic system for operational support of cosmonaut's extravehicular activity / V.A. Dikarev, A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev, E.V. Nikitov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2022. – No 3(44). – P. 69–84.
9. Motivation and results of modernization of multipurpose computer-aided simulator of robotic systems / V.A. Dikarev, V.A. Dovzhenko, E.V. Nikitov, Yu.S. Chebotarev // Manned Spaceflight. – 2021. – No 4(41). – P. 36–47.
10. Melas, V.B. Numerical comparison of permutation and classical methods of testing the statistical hypotheses // V.B. Melas, D.I. Sal'nikov, A.O. Gudulina // Bulletin of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. – 2016. – Vol. 3, No 3. – P. 415–423.
11. Kolmogorov, A.N. On the suitability of statistically found forecast formulas // Journal of Geophysics. – 2003. – Vol. 3, No 1. – P.78–82.
12. Kolmogorov, A.N. Probability theory and mathematical statistics: collection of papers. – Moscow: Nauka, 1986. – 535 p.