

На правах рукописи



Баранов Максим Сергеевич

**РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА
С ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РАБОТЫ
СЕНСОМОТОРНОЙ СИСТЕМЫ КОСМОНАВТА НА ЛУНЕ**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация
летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Строгонова Любовь Борисовна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Потапов Андрей Николаевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника и информационные системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования государственный лесотехнический университет Морозова» (ФГБОУ ВО «ВГЛУ»), г. Воронеж

Петелин Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, инструктор-космонавт-испытатель 2-ого класса группы инструкторов-космонавтов ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина», главный эксперт научно-технического совета Госкорпорации «Роскосмос», МО, п. г. т. Звёздный городок

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-клинический центр космической медицины и биологии» Федерального медико-биологического агентства (ФГБУ «ФНКЦ КМиБ» ФМБА России), г. Москва

Защита состоится «19» ноября 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188763

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП -3, Волоколамское шоссе, д.4. Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н., доцент



Д.Ю. Стрелец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При длительном пребывании в условиях лунной гравитации результат программы полета зависит от физического состояния и обеспечения работоспособности экипажа. Управление собственным телом в пространстве в условиях измененной гравитации претерпевает ряд изменений. Понижаются безопасность нормального функционирования, мониторинг за состоянием членов экипажа, поддержание навыков профессиональной деятельности, отработанных при наземных модельных тренировках и полетах вокруг Земли при воздействии негативных факторов длительного пребывания в неблагоприятных условиях космического полета или на планетах, в том числе на Луне.

После первого длительного пилотируемого полета, совершенного Николаевым А.Г. и Севастьяновым В.И. в 1970 г., на основании всестороннего анализа влияния длительного космического полета на работоспособность человека и возвращения к земной гравитации, системы адаптации и реабилитации космонавтов вошли в ГОСТ «Ракетно-космический комплекс». На основании исследований, посвященных выявлению двигательных нарушений в условиях микрогравитации, для которых доказана важная роль опорной афферентации в механизмах управления позной активностью, требуется создать математическое обеспечение и бортовой тренажерный комплекс с биологической обратной связью с целью повышения показателей качества сенсомоторной системы космонавта при выполнении научных и технологических работ на обитаемой лунной базе. Несмотря на участие ЕСА и КНЕСа в экспериментах, попытки создания адаптационно-реабилитационного комплекса для управления центром тяжести космонавта при измененной гравитации, - эксперимент «Поза», станция МИР ЕКА, КНЕС 1982 г., - признаны, с точки зрения тренажерного комплекса, неудачными.

«Качество 5-ти М» - гибкий инструмент определения качества, являющийся частью «ISO – 45001». Расписывать подробно все пять звеньев - космонавт, бортовой тренажерный комплекс, эпюра нормального положения центра тяжести, математическое обеспечение, окружающая среда «Луна-Земля» - не требуется. Одно звено, космонавт, имеет множество характеристик: точность, время, количество ошибок. Ключевое влияние на успешное выполнение целевых задач в условиях неопределенности - регламентные работы с любой бортовой аппаратурой, замена агрегатов в системе медико-технического обеспечения космического аппарата - оказывает управление телом космонавта в неисследованной среде Луны. Требуется определить новые подходы к техническому, технологическому и методическому обеспечению путей создания устройства, обеспечивающего безопасность нормального функционирования в неблагоприятных условиях на обитаемой лунной базе. В опубликованных исследованиях показана возможность компенсации негативных эффектов микрогравитации в мышечной системе с помощью адекватных мышечных нагрузок. Разработаны методы профилактики нервной системы во время длительных полетов - физические упражнения. В связи с изменением силы тяжести

нарушается согласованное взаимодействие сенсорных систем, обеспечивающих процесс двигательного управления; значительные сдвиги возникают в состоянии исполнительного мышечного аппарата, что приводит к ошибкам выполнения полетного задания. Для регистрации измененного положения центра тяжести космонавта и адаптации к тренировкам на бортовом тренажерном комплексе необходимо разработать математическое обеспечение, позволяющее сформировать процедуру принятия решений в условиях неопределенности. Разработанный бортовой тренажерный комплекс представлен простым для космонавта, удобным для пользования, удовлетворяет требованиям по точности измерения с гарантированной вероятностью 95% и является частью системы поддержки принятия управляющих решений на обитаемой лунной базе.

Согласно ГОСТу «Ракетный комплекс», в разделе «Пилотируемая космонавтика», без систем медико-технического обеспечения, входящих в состав проектирования и конструкции летательных аппаратов, программа межпланетных пилотируемых полетов нереализуема.

В соответствии с изложенным актуальной задачей является разработка бортового тренажерного комплекса с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне.

Степень разработанности темы. В литературе рассмотрены системный подход для разработки математического обеспечения, основанного на интеграции частотно-временного анализа стабิโลграммы, оценке среднеквадратического отклонения центра давления с последующим построением эпюры правильного положения центра тяжести космонавта и идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта с помощью метода Прони для формирования процедур принятия решений в условиях неопределенности. Описаны показатели качества работы космонавта за счет адаптации сенсомоторной системы. Данная разработка относится к системам медико-технического обеспечения пилотируемых космических полетов.

Проведены экспериментальные исследования бортового тренажерного комплекса, разработано математическое обеспечение, позволяющее повысить показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне при выполнении научных и технологических программ на современном научно-техническом уровне.

Разработкой и созданием различных систем для тренировки сенсомоторной деятельности в России активно занимаются в АО "ОРКК" - "НИИ КП", ГНЦ РФ ИМБП РАН., ФГБУ "ФНКЦ КМиБ" ФМБА России., ГБУЗ "НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ".

В решение разнообразных задач практического применения систем работоспособности большой вклад внесли многие отечественные и зарубежные исследователи: Козловская И.Б., Орлов О.И., Юров И.Б., Б.С. Шенкман Б.С., Клеман. Ж., Решке М.Ф.

Объект исследования – бортовой тренажерный комплекс, разработанный для исследований в условиях космического полета, обитаемой лунной базы и земной гравитации.

Предметом исследования являются показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта.

Цель работы – разработка бортового тренажерного комплекса с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработка бортового тренажерного комплекса для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне;
2. Разработка математического обеспечения, позволяющего повысить требуемые показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе;
3. Разработка специализированного прикладного программного обеспечения, предназначенного для специализированных задач в области адаптационно-реабилитационных процессов;
4. Разработка узла биологической обратной связи, позволяющего проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательств оператора;
5. Проведение функционального экспериментального исследования на бортовом тренажерном комплексе;
6. Разработка автоматизированной системы «ТРУД-ОТДЫХ» для выявления результата теста «Реакция на движущийся объект» («РДО») с наименьшим числом ошибочных сведений, характеризующего показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что автором впервые получены следующие научные результаты:

1. Разработан бортовой тренажерный комплекс с динамической мягкой опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.
2. Разработано математическое обеспечение, позволяющее повысить требуемые показатели качества сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.
3. Получен результат процесса идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта для формирования процедур принятия решений в условиях неопределенности.
4. Разработана автоматизированная система «ТРУД-ОТДЫХ» для выявления результата теста «Реакция на движущийся объект» (РДО) с наименьшим числом ошибочных сведений, характеризующего показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом комплексе на Луне.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории исследования совершенствования бортового тренажерного комплекса с биологической обратной связью (biofeedback).

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработано математическое обеспечение для бортового тренажерного комплекса, входящего в состав аванпроекта лунной базы.
2. Проведены функциональные испытания с участием испытуемых на лабораторном образце бортового тренажерного комплекса для последующего выпуска малой серии.
3. Разработано специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для специализированных задач в области адаптационно-реабилитационных процессов.
4. Доказано, что бортовой тренажерный комплекс удовлетворяет требованиям по точности измерения с гарантированной вероятностью 95%, удобен и прост в использовании.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составили научные и практические труды отечественных и зарубежных ученых в области конструкции и проектирования агрегатов и систем летательных аппаратов, реабилитационных мер, направленных для повышения показателей качества сенсомоторной системы космонавта при выполнении научных и технологических работ на обитаемой лунной базе.

Использовались следующие источники информации:

- научные данные из журнальных статей, материалы научных конференций;
- данные модельных и натурных экспериментов;
- результаты собственных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Бортовой тренажерный комплекс с динамической мягкой опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.
2. Математическое обеспечение, позволяющее повысить требуемые показатели качества сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.
3. Результат процесса идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта для формирования процедур принятия решений в условиях неопределенности.
4. Узел биологической обратной связи, позволяющий проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательств оператора, характеризуемый совместной деятельностью двигательной и нервной систем космонавта.
5. Автоматизированная система «ТРУД-ОТДЫХ» для выявления результата теста «Реакция на движущийся объект» (РДО) с наименьшим числом ошибочных сведений, характеризующего показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом комплексе на Луне.

Достоверность полученных результатов и заключений подтверждается четким формулированием основных положений исследований. Диссертационная работа включает в себя расчетно-экспериментальную часть, следовательно точность результатов и сделанных выводов подтверждается строгостью изложения

основных положений, интеграцией математических методов, проведением модельных и функциональных экспериментов.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 20-й международной конференции «Авиация и космонавтика» Москва, МАИ, 22-26 ноября 2021 г.; на 21-й международной конференции «Авиация и космонавтика» Москва, МАИ, 21-25 ноября 2022 г.; на 22-й международной конференции «Авиация и космонавтика» Москва, МАИ, 20-24 ноября 2023 г.; на 23-й международной конференции «Авиация и космонавтика» Москва, МАИ, 18-22 ноября 2024 г.; на XV Всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва, МАИ, 24 ноября 2023 г.

Публикации. Содержание диссертации изложено в восемнадцати публикациях, в том числе – в трех изданиях Перечня ВАК по специальности 2.5.13., в пяти изданиях Перечня ВАК по другим специальностям, – в десяти публикациях по материалам всероссийских и международных научных конференций.

Личный вклад автора. Формулировка цели и задач исследования, обобщенная методика выбора параметров конструкторского предложения бортового тренажерного комплекса, разработка математического обеспечения, экспериментальные исследования выполнены автором самостоятельно. Подана заявка на патент № 2025124810 (058593).

Результаты работы внедрены на базе ФГБУ «ФНКЦ КМиБ» ФМБА России и НИИ скорой помощи имени Н.В. Склифосовского. Отдельные разделы работы используются в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Биомеханика и переносимость ускорений», «Биомеханика» и «Специальные главы высшей математики» на кафедре 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Общий объем работы составляет 111 страниц, включая 47 рисунков, 6 таблиц; список литературы включает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень разработанности темы, представлены объект и предмет исследования, сформулированы цель работы и задачи, раскрыты научная новизна, теоретическая значимость работы и практическая значимость научных результатов, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, представлены апробация результатов диссертационной работы, публикации и личный вклад автора.

Первая Глава посвящена анализу особенностей лунной среды, освещены негативные факторы космического полета и их воздействия на костно-мышечную систему человека, рассмотрены результаты наземного модельного эксперимента, проводимом на лабораторном образце. Показано место бортового тренажерного

комплекса в общей структуре медико-технического обеспечения в соответствии с ГОСТ «Ракетно-космический комплекс» (Рисунок 1).

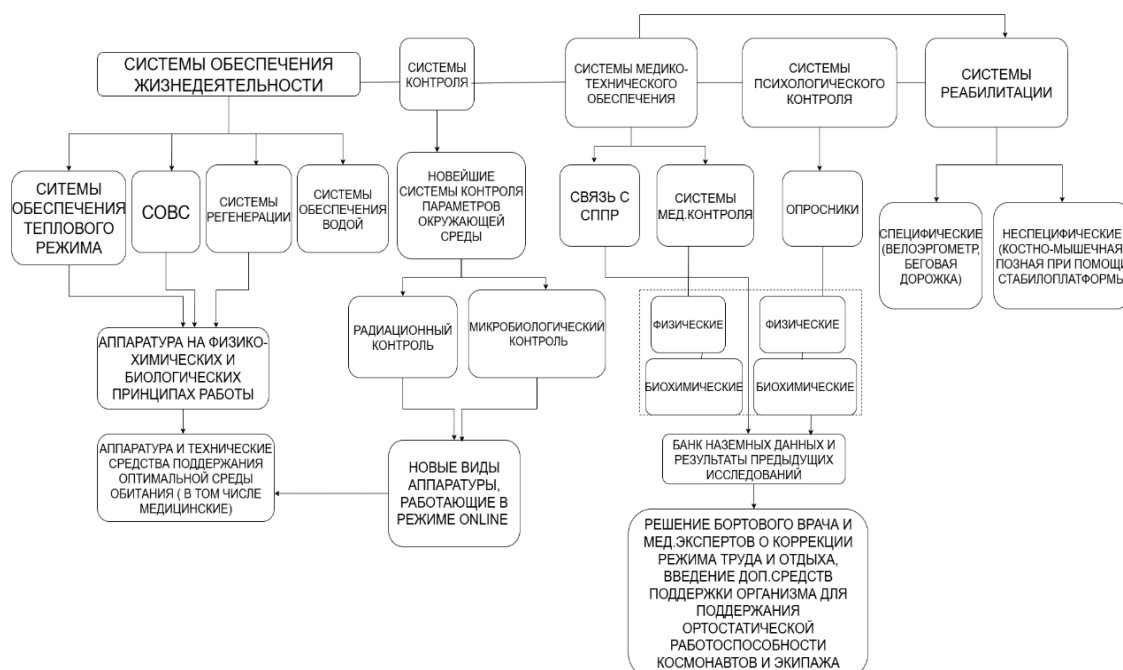


Рисунок 1 – Система медико-технического обеспечения

Динамическая опорная система бортового тренажерного комплекса (Рисунок 2), представленная в виде блок-схемы (Рисунок 3) и расположением силовых датчиков с датчиками угла отклонения стопы (Рисунок 4), имеет следующие технические и массогабаритные характеристики, представлены в Таблице 1.



Рисунок 2 – Динамическая опорная система бортового тренажерного комплекса

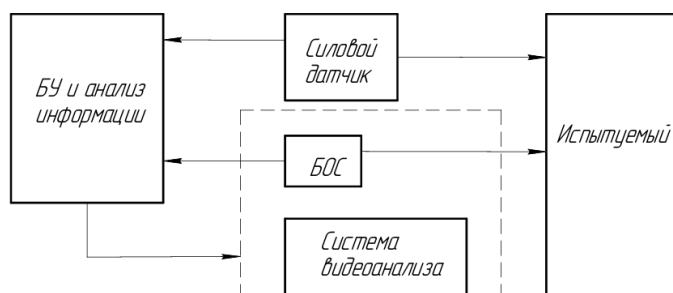


Рисунок 3 – Блок-схема опорной системы бортового тренажерного комплекса

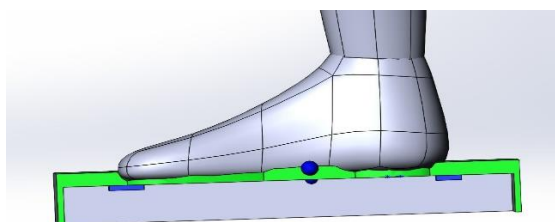


Рисунок 4 – Расположение стоп на опорной системе бортового тренажерного комплекса с силовыми датчиками и датчиками угла отклонения стопы

Таблица 1 – Технические и массогабаритные характеристики опорной системы бортового тренажерного комплекса

№	Наименование	Массогабаритные характеристики	Технические характеристики
1	Техническая система	Габаритные размеры, мм, ($\pm 10\%$) 300×300 Масса, кг, 10,0	Обеспечивает регистрацию координат центра приложенного давления. Подключение к Блоку управления и анализа информации (ПК) осуществляется с помощью проводного интерфейса типа USB. Частота дискретизации не менее 1024Гц.
2	Силовые датчики	Габаритные размеры, мм, ($\pm 10\%$) $45 \times 35 \times 20$ Масса, кг, 0,040	Электропитание осуществляется от аккумуляторной батареи с выходным напряжением 3,7 В, емкостью не менее 800 мА·ч
3	Блок управления и анализа информации (ПК)	Габаритные размеры, мм, ($\pm 10\%$) $500 \times 500 \times 700$ Масса, кг, 12,0	Электропитание - от сети переменного тока напряжением 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц.
4	Модуль БОС	Габаритные размеры, мм, ($\pm 10\%$) $1000 \times 1500 \times 500$ Масса, кг, 21,0	Электропитание монитора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В $\pm 10\%$, Разрешение не менее 1024×720 пикселей;

Во второй Главе представлено математическое обеспечение, основанное на интеграции спектра Гильберта-Хуанга, метода ковариации и метода Прони, позволяющее повысить требуемые показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе. Определен комплексный подход к разработке математического обеспечения (Рисунок 5) бортового тренажерного комплекса.

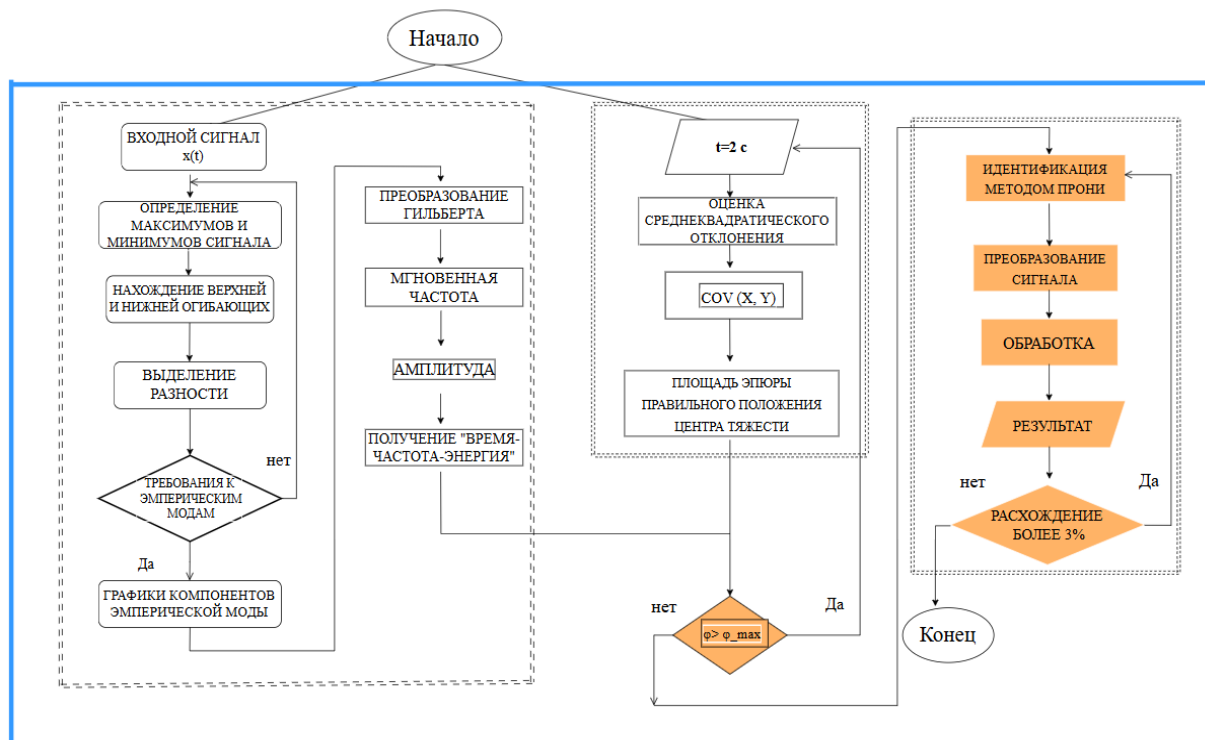


Рисунок 5 – Блок-схема математического обеспечения бортового тренажерного комплекса

Приведены модели, методы и алгоритмы для регистрации измененного положения центра тяжести космонавта и адаптации к тренировкам на бортовом тренажерном комплексе. На основании анализа выбраны:

1) Метод преобразования Гильберта-Хуанга необходим (Рисунок 6) для подробной характеристики частотно – временного анализа стабิโลграммы;

Преобразование Гильберта-Хуанга:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

Фаза:

$$\theta_i(t) = \arctg \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (2)$$

Мгновенная частота:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (3)$$

Амплитуда:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (4)$$

Спектр Гильберта:

$$H(\omega, t) = \sum_{j=1}^n A_j(t) e^{i \int_0^t \omega_j(t) dt}, \quad (5)$$

где $H(\omega, t)$ - мгновенная амплитуда на частоте ω в момент времени t ; j - мнимая единица.

Маргинальный спектр:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt, \quad (6)$$

где T - длительность сигнала.

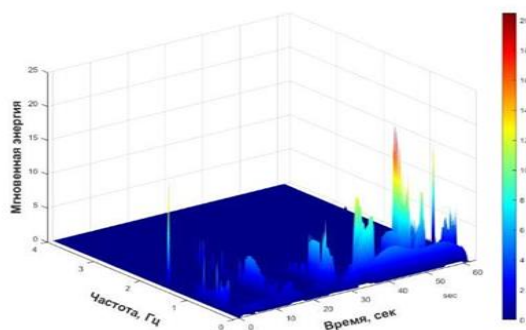


Рисунок 6 – Спектр Гильберта «Энергия-частота-время»

2) Метод ковариации необходим для построения эпюры правильного положения центра тяжести космонавта с учетом угла отклонения стопы (Рисунок 7). В процессе фиксируется время в моменты, когда отклонение центра давления в двух плоскостях постепенно начинает минимизироваться, происходит вычисление усредненных значений координат центра давления. Конечным результатом является эпюра правильного положения центра тяжести.

Случайные факторы: колебания динамической мягкой опорной системы, условие измененной гравитации и смещение внутренних органов, перераспределение жидких сред.

Доверительный интервал:

$$(\bar{x} - 3\sigma \leq x \leq \bar{x} + 3\sigma); (\bar{y} - 3\sigma \leq y \leq \bar{y} + 3\sigma), \quad (7)$$

$$x = \bar{x} \pm \Delta x; y = \bar{y} \pm \Delta y; P = 0.99, \quad (8)$$

где x, y – результат измерения; $\bar{x}, \bar{y}$ – среднее арифметическое значение; $\pm \Delta x, \pm \Delta y$ – доверительные границы погрешности; σ – среднеквадратическое отклонение; P – доверительная вероятность.

$$\sigma_x = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))^2} \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sqrt{D(Y)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - M(Y))^2}, \quad (10)$$

где $D(X), D(Y)$ – дисперсия соответствующей компоненты, а N – количество отсчетов в исследовании.

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))(Y_i - M(Y)) \quad (11)$$

Площадь рабочей эпюры правильного положения центра тяжести

$$S = 2 \ln \frac{1}{1-\beta} \sqrt{D(X)D(Y) - \text{Cov}(X, Y)^2}, \quad (12)$$

где β – вероятность нахождения точки статокинезиограммы в пределах эллипса доверительного интервала центра тяжести ($\beta = 0,9$). S представляет основную часть площади, занимаемой статокинезиограммой, исключая случайные выбросы. Величина характеризует рабочую площадь опоры человека. При вычислении площади эллипса доверительного интервала предполагается, что координаты центра давления подчиняются нормальному закону распределения. Выполнялась проверка методом Колмогорова-Смирнова.

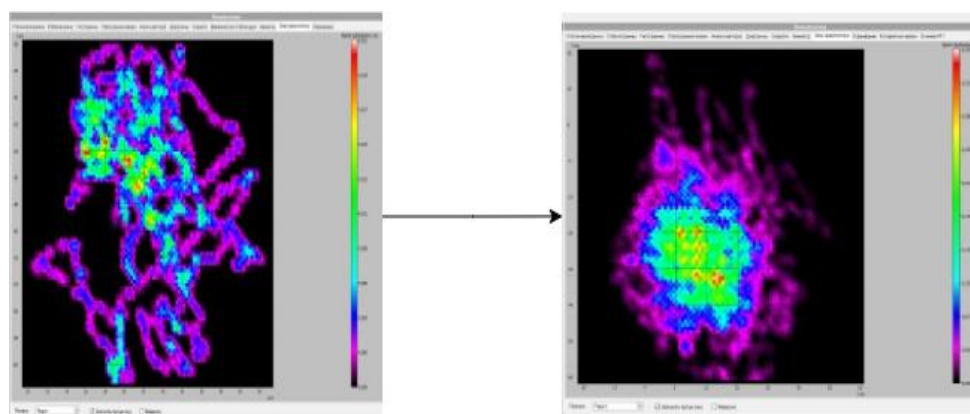


Рисунок 7 – Эпюра правильного положения центра тяжести (результат на первом лабораторном образце)

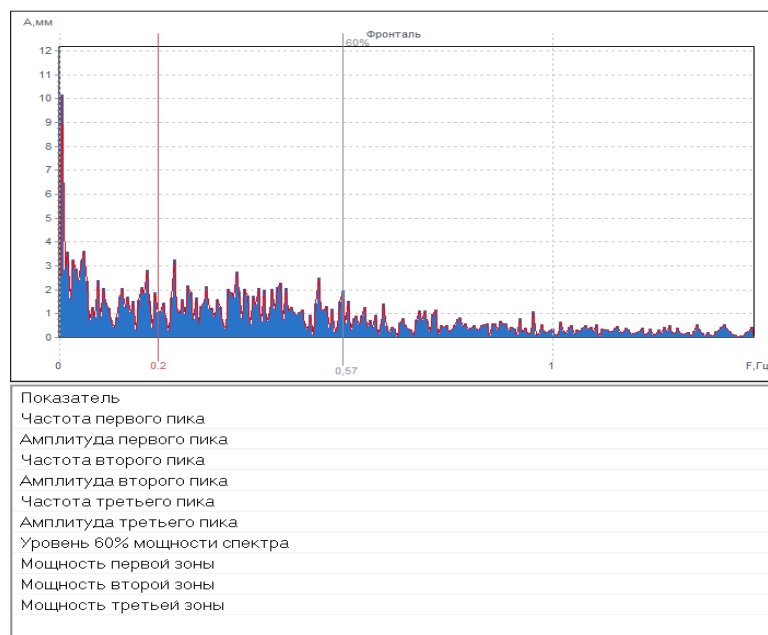


Рисунок 8 – Оценка смещения центра давления по фронтالي

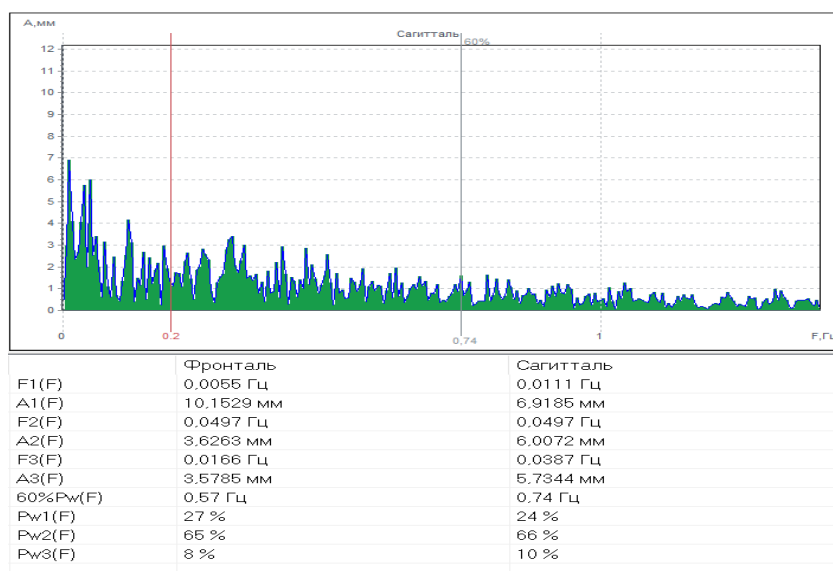


Рисунок 9 – Оценка смещения центра давления по сагиттали

3) Метод Прони актуален для формирования процедур принятия решений в условиях неопределенности с учетом идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта (Рисунок 10).

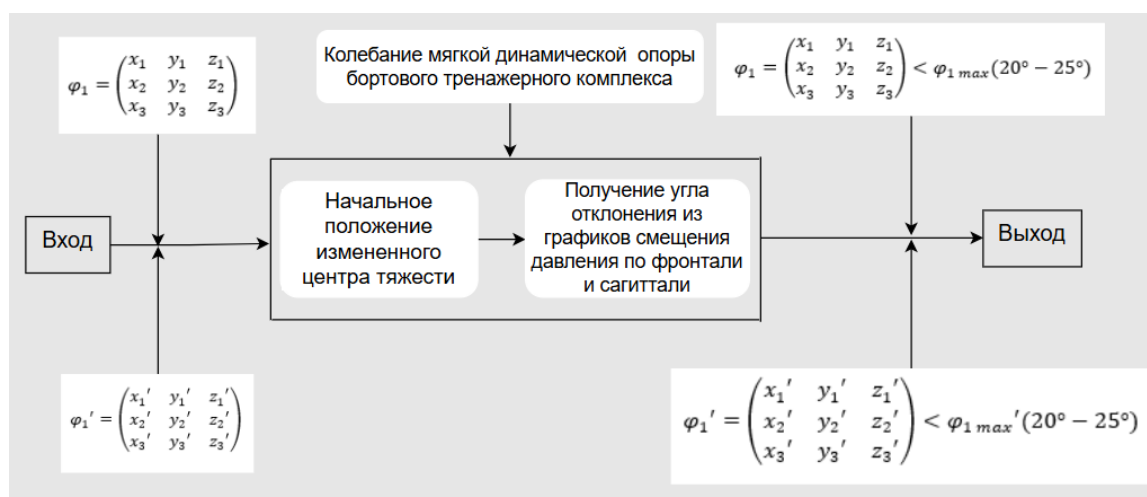


Рисунок 10 – Угловое отклонение центра тяжести космонавта

φ_1, φ_1' – углы отклонения, измеряемые датчиками, встроенными в опорную систему бортового тренажерного комплекса. Углы формируются из показаний амплитуд и частот, показанных по фронтالي и сагиттали, имеют три координаты, считывающихся с треугольника опоры стопы испытуемого. Величины не превышают максимальных значений углов отклонения – $\varphi_{1max}, \varphi_{1max}'$. Для идентификации математической модели используются показания амплитуд по фронтالي и сагиттали вместе со значением времени, взятом из спектра Гильберта-Хуанга; $x_1, y_1, z_1, \dots, z_3'$ – координаты точек треугольника опоры стопы. На Рисунке 11 представлен результат идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта, где 1- экспериментальная кривая отклонения центра тяжести космонавта; 2- предполагаемое отклонение центра тяжести космонавта.

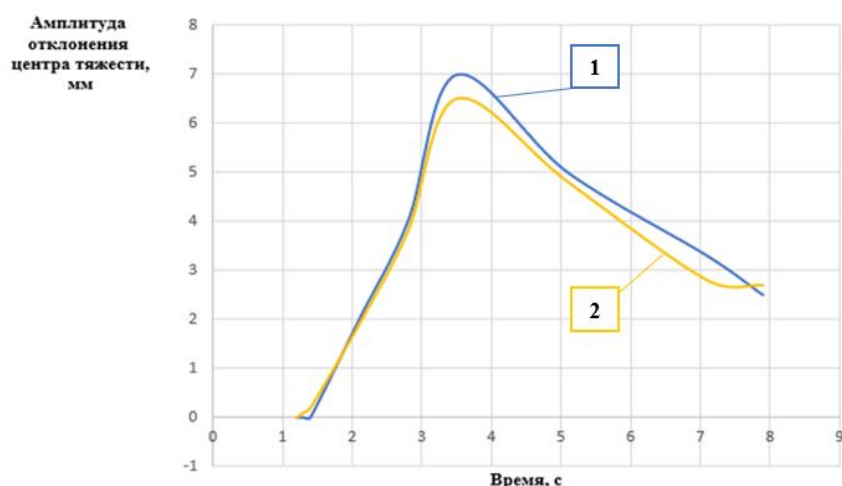


Рисунок 11 – Результат идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта

$$y(t) = Ae^{-\lambda t} \cos(\omega t - \varphi), \quad (13)$$

где $y(t)$ мгновенная амплитуда в момент времени t ; A – начальная амплитуда огибающей, мм; λ – скорость затухания, м/с; φ – фазовый угол, град; w – угловая

частота, Гц. Расхождение теоретической и экспериментальной кривой не более 3 %, что является допустимой погрешностью.

Третья Глава посвящена показателям качества (Рисунок 12), характеризующим работу сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе, разработке узла биологической обратной связи, позволяющего проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательства оператора в наземных условиях.

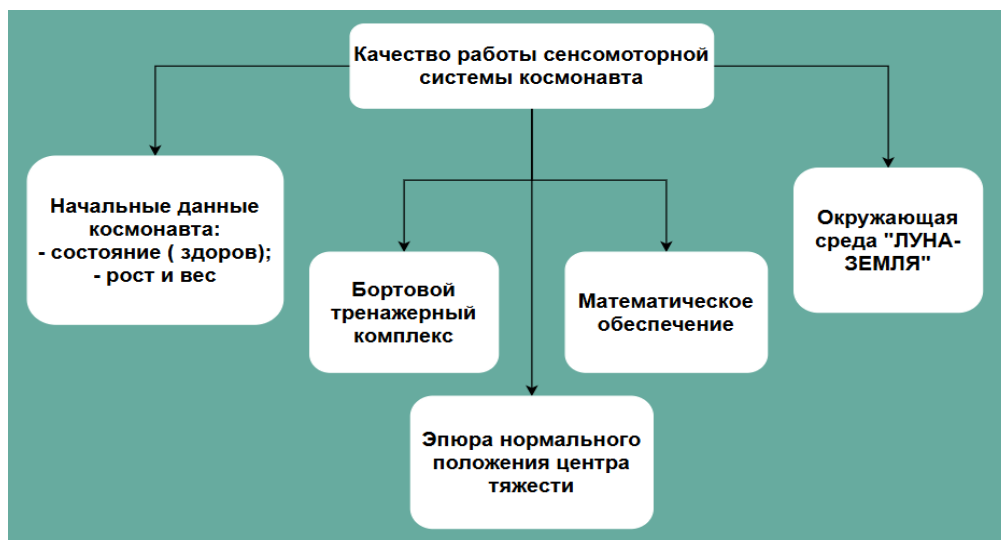


Рисунок 12 – Показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта

Узел биологической обратной связи, позволяющий проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательства оператора, представлен на Рисунке 13.

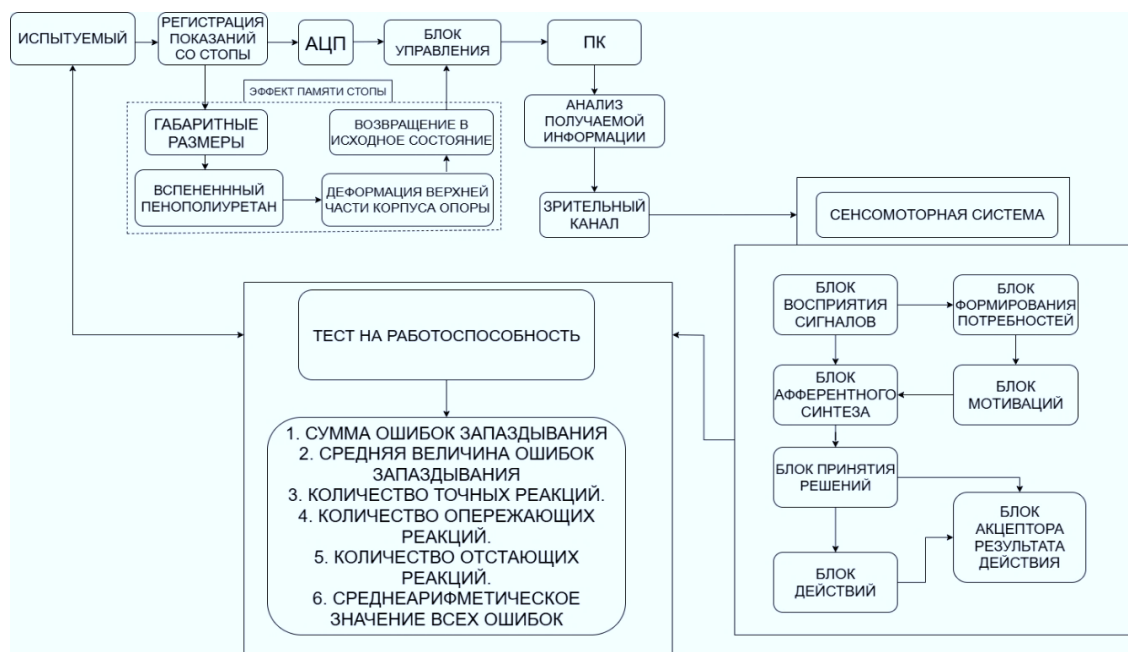


Рисунок 13 – Узел биологической обратной связи, позволяющий проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательства оператора

Методика экспериментального функционального исследования на бортовом тренажерном комплексе состоит из нескольких этапов (Рисунок 14).

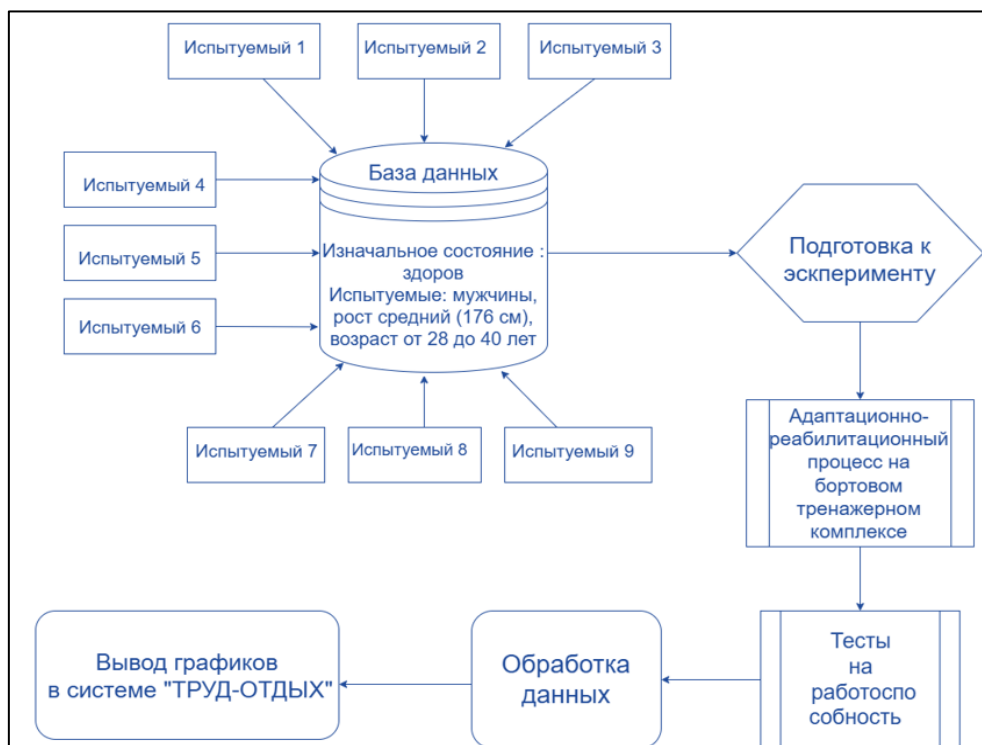


Рисунок 14 – Методика эксперимента

Достигнув правильного положения центра тяжести на бортовом тренажерном комплексе, испытуемый проходил тест на работоспособность для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы. Целевые задачи представлены на Рисунке 15.



Рисунок 15 – Целевые задачи

Наблюдалось повышение эффективности регламентных работ в результате исключения ошибок испытуемого, последствия которых катастрофичны при выполнении технологических работ на обитаемой Лунной базе. Специализированное программное обеспечение персонального компьютера (Рисунок 16) разработано для решения специализированных задач в области реабилитационно-адаптационного процесса. Программа имеет наиболее удобный интерфейс для синхронизации и передачи данных.



Рисунок 16 – Специализированное программное обеспечение

В четвертой Главе представлена разработка системы «ТРУД-ОТДЫХ» выявления результата теста «Реакция на движущийся объект» с наименьшим числом ошибочных сведений, характеризующего показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе на Луне.

На Рисунке 17 представлены этапы при построении системы «ТРУД-ОТДЫХ»:

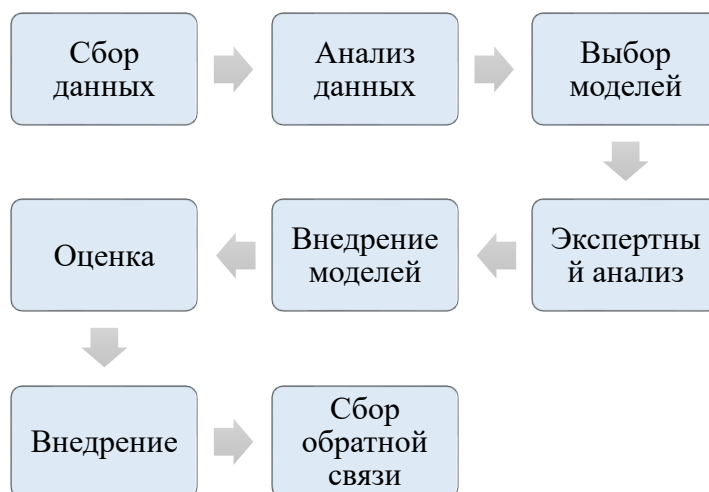


Рисунок 17 – Этапы при построении системы «ТРУД-ОТДЫХ», основанной на вероятностно-статистических методах

Параметры работоспособности космонавта в системе «ТРУД-ОТДЫХ» необходимы для создания и адаптации алгоритмов функционирования бортового тренажерного комплекса:

1) Структура системы «ТРУД-ОТДЫХ» (Рисунок 18) бортового тренажерного комплекса обеспечивает профессиональную деятельность в целях сохранения работоспособности лунной экспедиции в экстремальных условиях и обитаемой лунной базы;

2) «ТРУД-ОТДЫХ» прогнозирует управление центром тяжести космонавта и уровень работоспособности экипажа в условиях измененной гравитации;

3) Разработанная система заключает вероятностно-статистический выводы на основе байесовской классификации.



Рисунок 18 – Структура системы «ТРУД-ОТДЫХ»

Наблюдая за траекторией чёрной точки, испытуемый в предполагаемый момент совпадения с белой точкой нажимал кнопку «*STOP*», прерывая движение чёрной точки вдоль фигуры (Рисунок 19). Система рассчитывала абсолютную величину расхождения между позициями чёрной и белой точек, а по истечении определённого интервала возобновляла перемещение по контуру.

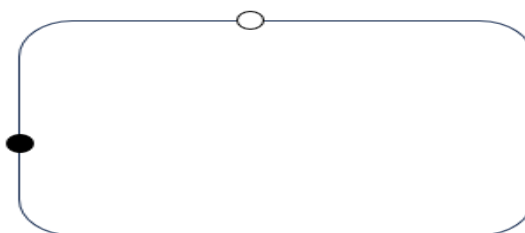


Рисунок 19 – Тест «реакция на движущийся объект»

$$T_p = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}, \quad (14)$$

где t_i – i -е отклонение черной и белой точки, мс; T_p – время реакции; n – число остановок черной точки в области положения белой. По значению времени реакции

T на движущийся объект оценивалась точность двигательных действий испытуемого. В процессе вычислялись результаты и заносились в компьютер (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты вычисления компьютера

Способ оценки соотношения процессов в сенсомоторной системе		Результат	Итоговая оценка
Средняя величина ошибок запаздывания, мс		11	Преобладание процессов торможения
Количество реакций	Количество опережающих реакций	8	Преобладание процессов возбуждения
	Количество отстающих реакций	4	
Среднеарифметическое значение ошибок, мс		3,7	Преобладание процессов торможения
Суммы ошибок запаздывания, мс		79	Преобладание процессов торможения

В системе «ТРУД-ОТДЫХ» используется нормальное распределение, среднеарифметические ошибки являются случайными данными. Проверка нормального распределения осуществлялась методом Колмогорова-Смирнова. Распределение плотности вероятностей диагностического параметра x для работоспособного состояния D_1 и не работоспособного D_2 состояний - один из методов оценки или выявления технического состояния оборудования основан на применении вероятностно-статистических подходов к принятию решений и актуален для выявления оптимального результата работоспособности (Рисунок 20):

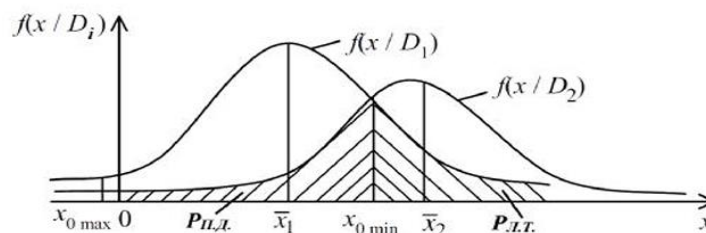


Рисунок 20 – Распределение плотности вероятностей физического признака x для исправного D_1 и неисправного D_2 состояний

$x_{0\max}$, $x_{0\min}$ – соответствуют экстремальным значениям усреднённого риска ошибочных заключений; $P_{н.д.}$, $P_{л.т.}$ – обозначают, соответственно, вероятность не обнаружить дефект и выдать ложную тревогу. Области, соответствующие исправному (D_1) и неисправному (D_2) состояниям частично перекрываются, что делает невозможным выбор значения x_0 , полностью исключающее ошибочные решения. Задача состоит в определении оптимального значения x_0 ,

минимизирующего количество неверных заключений. Возможные ошибки при принятии решений включают ошибку первого типа, когда объект в исправном состоянии ошибочно классифицируется как неисправный, вместо D_1 принимается D_2 , и ошибка второго типа, когда дефектный объект ошибочно признается исправным, вместо D_2 принимается D_1 . Обозначены возможные решения, основанные на определенных правилах, гипотезах, через H_{ij} : где индекс i – принятое решение, j – на фактическое состояние: H_{21} – представляет ложное срабатывание, - ошибка первого рода; H_{12} – соответствует пропуску неисправного состояния или дефекта, - ошибка второго рода; H_{11} – обозначает верное заключение об исправном состоянии; H_{22} – обозначает верное заключение о неисправном состоянии.

$$P(H_{21}) = P(D_1) * P(x > x_0 / D_1) = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x_0 / D_1) dx = P_1 [1 - F(x_0 / D_1)], \quad (15)$$

где $P_1 = P(D_1)$ – вероятность получения неудовлетворительной отметки D_1 до проверки;

$F(x_0 / D_1) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_1) dx$ - на промежутке определяющаяся функция распределения; устанавливается вероятность необнаружения дефекта, зависящая от факта существования дефектного состояния и того, что значение x для состояния меньше порогового x_0 :

$$P(H_{12}) = P(D_2) * P(x < x_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_2) dx = P_2 [F(x_0 / D_2)], \quad (16)$$

где $P_2 = P(D_2)$ – априорная вероятность получения неудовлетворительной оценки

D_2 ; $F(x_0 / D_2) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_2) dx$ - на промежутке определяющаяся функция распределения.

Если назначить цену каждому виду ошибки (C_{21} – цена ложного срабатывания, а C_{12} – цена невыявленного дефекта), получится конечное общее уравнение для расчета усредненного риска:

$$R = C_{21} P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x_0 / D_1) dx + C_{12} P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_2) dx = C_{21} P_1 [1 - F(x_0 / D_1)] + C_{12} P_2 F(x_0 / D_1) \quad (17)$$

Результаты уменьшения количества ошибок в каждом опыте у испытуемых представлены в Таблице 3. Обработка экспериментальных данных проведена с

помощью регрессионного анализа. График уменьшения ошибок у испытуемых (X8, X9) отражен на Рисунке 21.

Таблица 3 – Среднеарифметическое значение ошибок в каждом опыте у 9-ти испытуемых (X1-X9)

№ испытуемого	№ опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X1	7.2	5.8	5.1	4.8	4.4	3.7	3.2	2.8	2.5
X2	8.4	8.1	6.5	6.3	5.7	4.2	3.8	3.6	3.4
X3	5.3	5.1	4.8	4.5	4.3	3.5	3.2	2.8	2.4
X4	11.6	11.1	8.1	7.5	7.3	6.8	6.4	5.3	4.4
X5	12.1	11.8	10.5	9.5	8.4	7.5	6.4	5.8	5.4
X6	9.1	8.5	6.7	5.3	5.1	4.2	3.8	2.1	1.7
X7	9.8	8.7	8.4	7.7	7.4	5.3	4.1	2.8	2.1
X8	10.4	10.1	9.8	9.4	8.1	7	6	5.5	3.3
X9	7.7	7.1	6.5	5.2	4.2	3.6	3.1	2.4	1.5

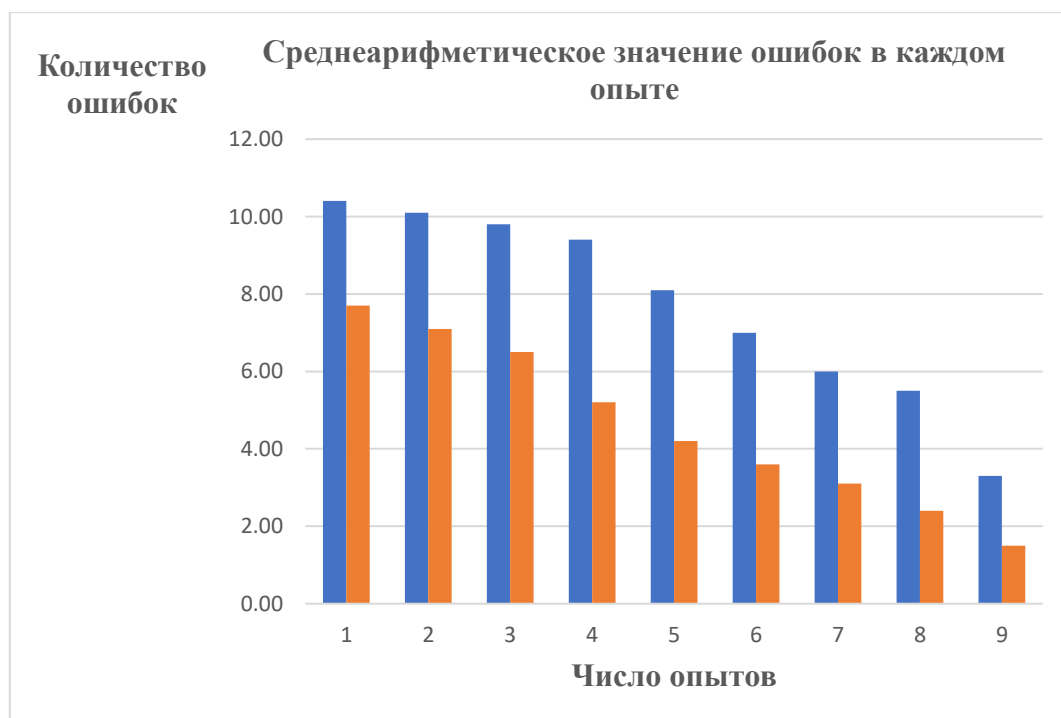


Рисунок 21 – Среднеарифметическое значение ошибок у испытуемых (X8, X9) в каждом опыте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан бортовой тренажерный комплекс с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне.

Новые научные результаты, полученные автором в ходе исследования состоят в следующем:

1. Разработанный бортовой тренажерный комплекс с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне удовлетворяет требованиям по точности измерения с гарантированной вероятностью 95%.

2. Разработано математическое обеспечение, позволяющее повысить требуемые показатели качества сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе, с вероятностью требуемого положения центра тяжести не менее 0,9.

3. Разработано специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для специализированных задач в области адаптационно-реабилитационных процессов.

4. Разработан узел биологической обратной связи, позволяющий проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательств оператора, характеризуемый совместной деятельностью двигательной и нервной систем космонавта.

5. Проведенные экспериментальные функциональные исследования с участием испытуемого показали, что после тренировки сенсомоторной системы космонавта наблюдается повышение эффективности регламентных работ за счет исключения ошибок испытуемого.

6. Разработана система «ТРУД-ОТДЫХ» для выявления результата теста «Реакция на движущийся объект» («РДО») с наименьшим числом ошибочных сведений, характеризующего показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе, с гарантированной вероятностью 90%.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Для эффективной оценки функционального состояния космонавта необходимо определить ключевые характеристики. Формируются рекомендации для космонавта с использованием интеллектуальной системы. Предложена экспертная система оценки, функционирующая на основе комбинированного подхода к построению алгоритма.

В ПРИЛОЖЕНИИ к диссертации представлены Акты внедрения результатов диссертации в исследовательские работы ФГБУ "ФНКЦ КМиБ" ФМБА России и в учебный процесс Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем учёной степени

Научные статьи в рецензируемых изданиях Перечня ВАК Минобрнауки России по специальности 2.5.13.:

1. Баранов М.С., Строгонова Л.Б. Особенность повышения качества работоспособности космонавтов в условиях обитаемой лунной базы на бортовой технической системе контроля и положения центра тяжести // Качество и жизнь. – 2025. – № 2. – С. 76 – 81.

2. Баранов М.С. Анализ конструкции и математического обеспечения технической бортовой системы для поддержания работоспособности космонавтов в условиях измененной гравитации // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2025. – № 9 (165). – С. 1 – 13.

3. Баранов М.С., Строгонова Л.Б. К вопросу о проведении реабилитационно-адаптационных мероприятий у космонавтов на технической бортовой системе в условиях обитаемой лунной базы // Пилотируемые полёты в космос. – 2025. – № 4 (57). – С. 136 – 144.

Научные статьи в рецензируемых изданиях Перечня ВАК Минобрнауки России по другим специальностям:

1. Баранов М.С., Строгонова Л.Б. Методы математического моделирования при определении положения центра тяжести с учетом перераспределения крови в нижних конечностях у космонавтов в эксперименте «СТАБИЛО» // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022 г. – № 6. – С. 9-13.

2. Строгонова Л.Б., Васин Ю.А., Баранов М.С., Сафронова К.П. Структура системы поддержки принятия решений (СППР) для медико-технического обеспечения обитаемой лунной базы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023 г. – № 6. – С. 114-117.

3. Афоничев Н.К., Баранов М.С., Васин Ю.А. Применение методов математического моделирования при определении методов положения трехглавой мышцы голени космонавтов в условиях измененной гравитации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023 г. – № 6. – С. 34 – 37.

4. Строгонова Л.Б., Васин Ю.А., Баранов М.С. К вопросу выбора методов математической обработки сигналов, применяемых в системе реабилитации с биологической обратной связью в условиях измененной гравитации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024 г. – № 3. – С. 59 – 61.

5. Норов Р.З., Строгонова Л.Б., Баранов М.С. Математическое моделирование кровоснабжения космонавта в реабилитационном периоде // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025 г. – № 4. – С. 80 – 84.

Материалы всероссийских и международных научных конференций:

1. Баранов М. С. Разработка синхронизации сигнала с Equitest на миограф при оценке вертикальной устойчивости человека до и после космических полётов // Сборник трудов XIII Всероссийской научно-технической студенческой школы-семинара «Аэрокосмическая декада», Алушта, 26 сентября - 2 октября 2020 г. – Алушта, – 2020 г. – С.11-13.

2. Баранов М. С. Актуальные вопросы разработки синхронизации сигнала с аппаратуры «Equitest» на миограф при контрольной оценке вертикальной устойчивости человека в условиях длительных пилотируемых космических полётов // Тезисы 20-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 22 – 26 ноября 2021 г. – Москва, – 2021. – 331с.

3. Баранов М. С. Разработка нетвёрдой опоры, обеспечивающей восстановление опорно-двигательных функций нижних конечностей космонавтов в реабилитационном периоде / М. С. Баранов // Тезисы 21-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 21 – 25 ноября 2022 г. – Москва, – 2021. – 318с.

4. Афоничев Н. К., Баранов М.С. Разработка вспомогательного устройства для проведения тренировки на трёхглавую мышцу голени в условиях микрогравитации // Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения 2023», Москва, 11 – 14 апреля 2023 г. – Москва, – 2023. – 481с.

5. Головня Д., Баранов М.С. Применение компьютерной томографии для оценки состояния костной ткани в условиях длительных пилотируемых космических полётов // Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения 2023», Москва, 11 – 14 апреля 2023 г. – Москва, – 2023. – С. 485-486.

6. Норов Р. З., Баранов М.С. Разработка неинвазивного технического устройства для диагностики состояния мышечных функций сердца у космонавтов в реабилитационном периоде после длительного пилотируемого космического полёта // Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения 2023», Москва, 11 – 14 апреля 2023 г. – Москва, – 2023. – С. 497-498.

7. Дворак М.А., Баранов М. С. Разработка технического средства диагностического обеспечения реадaptации мышц конечностей в условиях изменённой гравитации // Сборник тезисов работ международной молодёжной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения 2023», Москва, 11 – 14 апреля 2023 г. – Москва, – 2023. – 487с.

8. Баранов М.С., Строгонова Л.Б., Юров И.Б. Анализ конструкции узлов и агрегатов реабилитационной адаптационной системы медико-технического обеспечения и её применения в условиях лунной гравитации // Тезисы 22-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 20 – 24 ноября 2023 г. – Москва, – 2023. – 203с.

9. Баранов М. С., Строгонова Л.Б. Разработка медико-технического обеспечения, применяемого для космонавтов при длительном пребывании в условиях изменённой гравитации // Сборник аннотаций конкурсных работ XV Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 20-24 ноября 2023 г. – Москва, – 2023. – 92с.

10. Строгонова Л. Б., Баранов М.С., Васин Ю.А. Структура системы поддержки принятия решений при восстановлении активной работоспособности экипажа в условиях изменённой гравитации на обитаемой лунной базе // Тезисы 23-ей Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 18 – 22 ноября 2024 г. – Москва, – 2024. – С. 178-179.

.