

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Строгонова Любовь Борисовна

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПИЛОТИРУЕМЫЕ ЭКСПЕДИЦИИ.....	11
1.1 Особенности Лунной среды обитания	11
1.2 Системы медико-технического обеспечения Лунной базы.....	14
1.3 Современные методы медицинской реабилитации костно-мышечной системы космонавтов после длительных пилотируемых полетов	17
1.4 Обзор математических методов обработки данных	25
1.5 Методы экспериментальных исследований по системам реабилитации	28
1.6 Система поддержки принятия решений (СППР) медико-технического обеспечения для адаптации на Лунной базе.....	37
1.7 Состав конструкции и проектирования бортового тренажерного комплекса...	39
1.8 Постановка задачи исследования	41
Заключение по Главе 1	41
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА.....	43
2.1 Проектирование математического обеспечения	43
2.2 Структура алгоритмов в математическом обеспечении	46
2.3 Математическое обеспечение бортового тренажерного комплекса.....	56
Заключение по Главе 2	63
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БОРТОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА	64
3.1 Обратная связь бортового тренажерного комплекса	64
3.2 Качество работы сенсомоторной системы космонавта	70
3.3 Специализированное прикладное программное обеспечение	72
Заключение по Главе 3	73
ГЛАВА 4 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ТРУД-ОТДЫХ».....	75
4.1 Этапы и структура системы «ТРУД-ОТДЫХ»	75
4.2 Определение тестов.....	82
4.3 Изучение реакции на движущийся объект	86
Заключение по Главе 4	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ	108
Акты внедрения диссертационной работы.....	108

ВВЕДЕНИЕ

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. Понижается 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 нахождения в космическом полете 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». Задавать и отвечать на все 5 вопросов - космонавт, бортовой

тренажерный комплекс, эпюра нормального положения центра тяжести, математическое обеспечение, окружающая среда «Луна-Земля» - не требуется. Один вопрос, космонавт, имеет множество ответов: 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. Разрабатываемый бортовой тренажерный комплекс представлен простым для космонавта, удовлетворяет требованиям по точности измерения с гарантированной вероятностью 95%, представлен удобным для пользования 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 не реализуема.

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. Приведены 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 ключевой 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, разрабатываемый 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 основные **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, позволяющего 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. 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 и 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%. Данный комплекс удобный и простой для пользования.

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 выполнения научных и технологических работ на обитаемой лунной базе.

Для написания работы 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, позволяющего 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 докладывались и обсуждались 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: из них в журналах Перечня ВАК – восемь; в десяти сборниках тезисов докладов научных конференций.

Личный вклад автора. Формулировка цели и задач исследования, обобщенная методика выбора параметров конструкторского предложения бортового тренажерного комплекса, разработанная математическое обеспечение, 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 работы и объем работы. Диссертация 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 наименований.

ГЛАВА 1 МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПИЛОТИРУЕМЫЕ ЭКСПЕДИЦИИ

1.1 Особенности Лунной среды обитания

Анализ медико-биологических факторов в условиях неопределенности лунной среды, рассматриваемой в качестве места для выполнения целевых задач космонавтом, отображает, что высадка экипажа на Луну связана с экстремальными условиями. Для осуществления деятельности и безопасности на обитаемой лунной базе необходимо применение средств индивидуальной защиты. Необходимо учитывать перечень факторов лунной среды для выполнения межпланетных полетных заданий экипажем: не существует газовой атмосферы, давление пренебрежительно мало и стремится к нулю, колебание температур, от и до, на ее поверхности, что влечет за собой полное отсутствие кислорода, необходимого для поддержания работоспособности и безопасности жизнедеятельности человека; гипогравитация, практическое отсутствие магнитного поля; у поверхности Луны отсутствует защита от воздействия галактического космического излучения и солнечных вспышек; резкие перепады температуры - от $170-160^{\circ}\text{C}$ - в ночное время. До $+120-130^{\circ}\text{C}$ в дневные часы; непривычная для земных условий длительность лунного дня и ночи, по две недели, их продолжительность всегда остается постоянной; более регулярные - примерно 2 раза в месяц - и продолжительные по сравнению с Землей лунотрясения; микрометеоритные дожди, возможность столкнуться с более крупными метеоритами; покрывающая поверхность Луны мелкодисперсная пыль - реголит [1, 2]. На основании вышеперечисленного можно сделать вывод что, внешние факторы, с которыми сталкивается экипаж при выполнении пилотируемых межпланетных заданий на Лунной поверхности (Таблица 1.1), существенно отличаются от внешних неблагоприятных условий, появляющихся на орбитальной станции и при выполнении внекорабельной деятельности.

Таблица 1.1 – Степень изученности основных факторов риска пилотируемых полетов на Луну

Название фактора	Степень изученности*	Вопросы, требующие исследований
Микрогравитация	++++-	Сочетанное действие микрогравитации, гипوماгнитной среды и радиации
Автономность полета	++++-	Сочетанное действие невесомости, гипوماгнитной среды и радиации на психологический статус человека и поведение малых групп
Радиация	+++--	Сочетанное действие радиации, микрогравитации. Длительное воздействие полного спектра различных видов космических излучений. Эффекты сочетанного действия радиации, микрогравитации, гипوماгнитной среды. Вторичное излучение
Гипомагнитная среда	++---	Полный цикл исследований. Имеется определенный задел
Гипогравитация	+----	Полный цикл исследований. Имеются отдельные публикации по наземному моделированию эффектов гипогравитации
Лунная пыль (реголит)	+----	Полный цикл исследований. Имеется определенный задел

* Оценка производилась в 5-уровневой оценочной системе, в которой (+++++) – максимальная уровень, (-----) – минимальный.

Заключения и результаты математических расчетов подтверждают, что для моделирования уровня гипогравитации, отличной от земных условий и соответствующей действию силы тяжести на поверхности Луны в условиях неопределенности, необходимо поменять действие вектора силы тяжести в наземных условиях на вектор, соответствующий $1/6$ силы тяжести на Земле, а именно $+9,6^\circ$ [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Результаты специальных методических исследований и лабораторных испытаний подтвердили расчеты, что позволило рассматривать проведение эксперимента методом постельного режима с расположением тела обследуемого человека под положительным углом наклона головного конца кровати, равным $+9,6^\circ$ (Рисунок 1.1), в качестве рабочей модели для изучения физиологических сдвигов в организме, характерных для пребывания человека (в вертикальном положении) в условиях лунной гравитации, с переводом его в горизонтальное положение на время ночного сна [9].

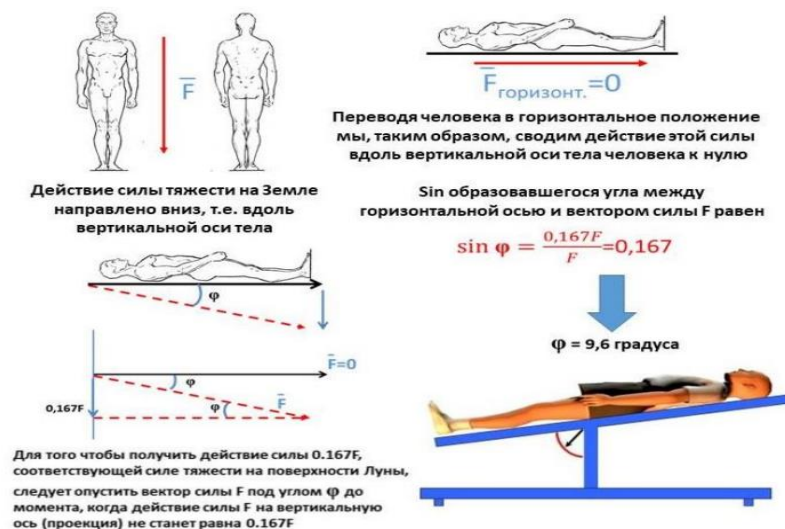


Рисунок 1.1 – Способ моделирования физиологических эффектов лунной гравитации методом постельного режима с расположением тела обследуемого под положительным углом наклона головного конца кровати, равным $+9,6^\circ$, на время дневной работы с переводом в горизонтальное положение на время ночного сна

1.2 Системы медико-технического обеспечения Лунной базы

Система медико-технического обеспечения состоит из следующих подсистем: связь с системой поддержки принятия решений, системы медицинского контроля, системы психологического контроля, системы реабилитации (Рисунок 1.2).

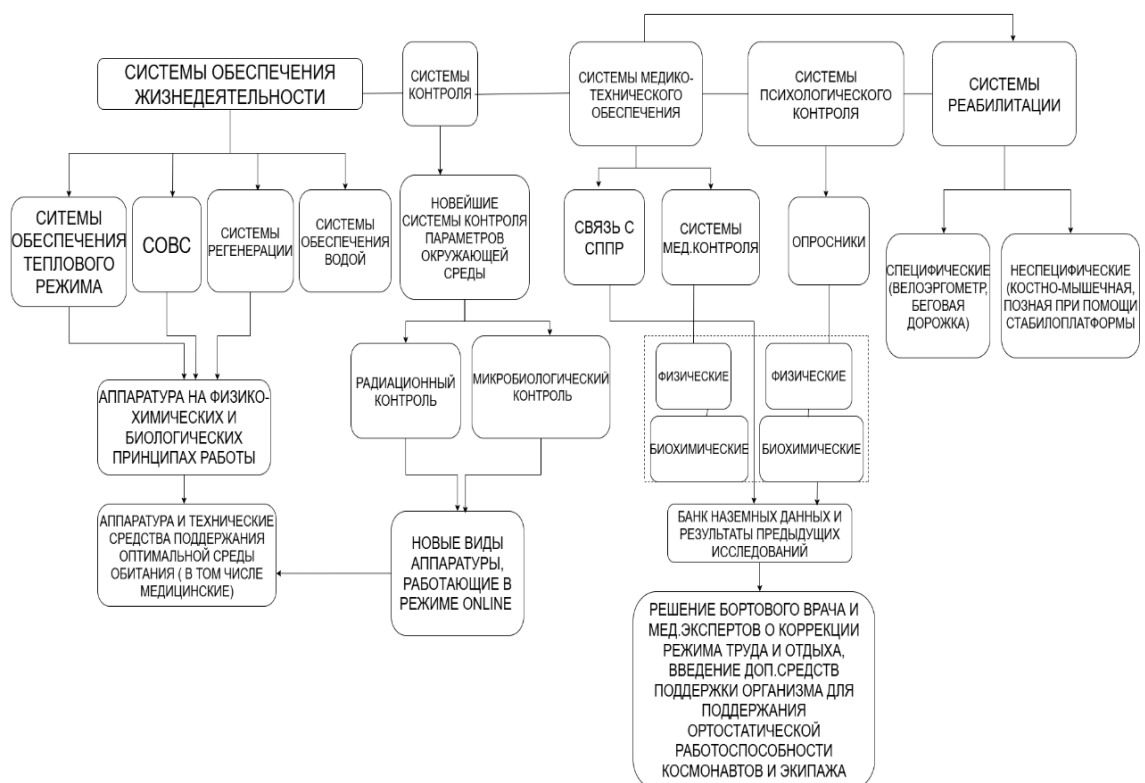


Рисунок 1.2 – Система медико-технического обеспечения

Вышеперечисленные подсистемы входят в состав проектирования, конструкции, производства, испытаний и эксплуатации летательных аппаратов.

В условиях пониженной гравитации возникает задача обеспечения стабильного положения тела человека относительно вертикальной оси, что влечет за собой определенную нагрузку на мышцы и расход энергии. Общие геологические особенности Луны будут оказывать лишь косвенное влияние на работу космонавта. Характеристики локальной местности в рабочей зоне - микрорельеф, свойства лунного грунта - непосредственно определяют позу, способы

передвижения, требования к скафандру и оборудованию, методы выполнения операций [10].

Когда космонавт в скафандре стоит на ровной поверхности, центр тяжести смещается вверх и немного назад. Для сохранения баланса равновесия требуется небольшой наклон корпуса вперед. Чтобы проекция центра тяжести тела находилась в пределах площади опоры, определяемой размером стоп и пространством - основная задача удержания равновесия человеком в стоячем положении. Ограничивающими факторами выступают коэффициент трения между подошвой обуви и грунтом, анатомические и физиологические возможности человека: амплитуда движений в суставах, сила мышц, координация. Особую важность приобретает подвижность голеностопных суставов при сохранении равновесия на наклонной поверхности.

Результаты исследований, проведенных в рамках российской программы Л-3, показали, что устойчивость в скафандре «Кречет-94» сохраняется без дополнительных приспособлений на склонах до 14 градусов. На более крутых склонах требовались осторожные действия, а на уклонах свыше 20 градусов могла понадобиться страховка в виде альпенштока или троса, удерживаемого другим членом экипажа. Возможно использование опор, наподобие палок для скандинавской ходьбы, которые будут выполнять аналогичную функцию фиксации, как и в условиях микрогравитации. Были разработаны и протестированы различные способы перемещения: обычная ходьба, подскоки при ходьбе, прыжки на двух ногах одновременно.

Потеря равновесия приводит к получению травм и падениям. Из-за небольшой скорости падения не представляют опасности для космонавта в скафандре, не исключено повреждение наружных частей скафандра при соприкосновении с обломками пород. Впрочем, медленное падение позволяет развернуться лицом к поверхности и попытаться встать. Падение можно предотвратить шагом в направлении наклона, но боковые шаги затруднены из-за ограниченной подвижности скафандра в области таза. При падении на спину требуется помощь или использование специальных техник и средств. В российской

практике разработаны методы и средства для подобных ситуаций. Для условий космического полета установлены характеристики передвижения и энергозатрат человека в скафандре, а также эргономические параметры рабочих мест, обзорность и доступность рабочих зон. Необходимо провести исследования для определения численных показателей характеристик в условиях пониженной гравитации. Рассматривая нагрузку на космонавта на Луне, логично сравнивать с нагрузкой при внекорабельной деятельности на орбитальной станции. При дальнейшем развитии интеллекта и психики произойдет интеграция человека и техники, которая трансформирует связку «человек — скафандр» в когнитивно-техническую систему - в активного участника работы в открытом космосе. Пребывание в скафандре создает физическую нагрузку на космонавта. Перемещение вдоль орбитальной станции с использованием поручней и транспортировка инструментов требуют минимальных усилий. Незначительно больше усилий необходимо для принятия и удержания удобной рабочей позы. Основная часть энергии расходуется при работе руками, включающей сгибание и разгибание элементов рукавов и пальцев перчаток скафандра. Весь спектр нагрузок на руки сохраняется и в условиях пониженной гравитации, но осложняется наличием лунной гравитации.

При ходьбе появляется функциональная нагрузка на ноги, которая отсутствует во время внекорабельной деятельности на орбите. Передвижение пешком, ручная переноска оборудования, сбор образцов горных пород, установка грунтоносов, становятся достаточно сложными задачами, требующими перерывов для отдыха.

Для определения продолжительности рабочих периодов необходимы количественные оценки энергозатрат при выполнении различных операций. Безопасность космонавта является приоритетом и находится в зоне ответственности специалистов при проектировании оборудования и разработке программы действий для каждого этапа работы.

Загрязнение пылью чревато риском повреждения защитных перчаток. Абразивное воздействие, оказываемое пылевыми частицами на трущиеся детали,

способно вызвать поломки узлов и внешних компонентов космического скафандра. Для защиты от пыли потребуется использовать технологии, аналогичные тем, что применяются для защиты от воды в подводных аппаратах.

Перемещение по наклонным поверхностям требует особой осторожности, в частности, из-за вероятного скольжения ботинок скафандра по выступающим породам, потери равновесия на склонах, возникновения оползней, падения камней [11].

Рассматривается адаптационно-реабилитационный бортовой тренажерный комплекс на обитаемой Лунной базе, в условиях космического полета и при длительном применении в послеполетном периоде.

1.3 Современные методы медицинской реабилитации костно-мышечной системы космонавтов после длительных пилотируемых полетов

Для оценки состояния опорно-двигательного аппарата (ОДА) и нервно-мышечной системы у космонавтов до и после курса медицинской реабилитации использовались функциональный и лабораторный методы. К функциональным методам относились денситометрия, *Hologic Inc., USA*, анализ вариабельности сердечного ритма, пульсоксиметрия и оценка судомоторной реакции с помощью комплекса *ESTECK System Complex, LD Technology, USA*, динамометрия мышц туловища, *CON-TREX TP, CENTAUR*, и нижних конечностей, *CONTREX MJ*. Баланс равновесия исследовали на многофункциональной опорной платформе для диагностики и тренировок опорно-двигательных функций и когнитивных расстройств с биологической обратной связью КОБС, *Physiomed*, Германия.

Контрольная оценка функционального состояния и коррекция дисфункций опорно-двигательного аппарата (ОДА) осуществлялись с использованием роботизированного биомеханического комплекса с биологической обратной связью *CONTREX*, модули *MJ* – для мышц и связок суставов нижних конечностей, *TP* – для мышц туловища, *Physiomed*, и роботизированной системы диагностики и

реабилитации *CENTAUR*, -для диагностики и тренировки автохтонных мышц туловища, *BFMS*, Германия. Механотерапия на *CONTREX* выполнялась в соответствующих режимах:

- «кон-кон» — космонавт самостоятельно выполняет движения сгибания-разгибания;
- «кон-экс» — космонавт постоянно прикладывает силу в направлении разгибания в суставе;
- «экс-кон» — космонавт постоянно прикладывает силу в направлении сгибания в суставе;
- «экс-экс» — режим постоянного сопротивления, при движении аппарата на сгибание или разгибание в суставе космонавт совершает противоположное действие.

В механотерапевтических сеансах применялся синусоидальный режим движения, при котором скорость постепенно нарастает по синусоидальной кривой до максимального предела, а потом плавно падает до нуля. Благодаря мягкой акселерации и децелерации вариант траектории наиболее близок к естественным движениям, характерным для повседневной активности в реальной жизни. Система биологической обратной связи в аппарате обеспечивает искусственную корректировку сопротивления, которое пропорционально силе, прилагаемой космонавтом. Перед и после активных тренировок выполнялась пассивная мобилизация суставов без участия мышечных сокращений — *СРМ*-терапия по 20 циклов. Для улучшения баланса равновесия мышечного корсета позвоночника использовалась статическая нагрузка на мышцы туловища в роботизированной системе с биологической обратной связью *CENTAUR*. Программа тренировочных занятий включала режимы «круговой импульс» и «космическое вращение» с наклоном от вертикали на 45°, в фиксированных углах поворота: 0°; 45°; 90°; 135°; -45°; -90°; -135°; 180° [12].

Постурология - уникальная сфера человеческого знания, посвященная исследованию процессов поддержания вертикального положения тела как в здоровом состоянии, так и при различных заболеваниях, формированию

компенсаторных механизмов регуляции позы. Значимость выделения медико-биологической дисциплины в самостоятельную науку подтверждается наличием за границей ряда ассоциаций экспертов в постурологии, включая влиятельную *Association française de posturologie*.

Статокинезиметрия, стабилметрия, представляет способ изучения характеристик колебаний центра давления (ЦД) на опорной поверхности стоящего или, реже, сидящего испытуемого. Метод используется для контрольной оценки способности поддерживать баланс равновесия и механизмов, обеспечивающих вертикальную позу, как в здоровом состоянии, так и при различных нарушениях. Более предпочтительным и распространенным в научной литературе является термин "статокинезиметрия", который буквально означает измерение движений человека, в частности, колебаний ЦД, возникающих при поддержании вертикальной позы. Термин "стабилметрия" используется реже.

В наземных модельных экспериментов отклонение тела от вертикального положения играет важную роль в процессе восстановления утраченного равновесия. Процесс является информационным и необходим для коррекции положения тела в пространстве.

Со стороны физиологии, поддержание равновесия у здорового человека можно интерпретировать как динамическое, контролируемое состояние неустойчивости. В рамках постоянного "отклонения от равновесия" для обеспечения вертикальной стойки тела доминирующую роль играет тоническая мускулатура.

История современной стабилметрии насчитывает чуть более шести десятилетий. Стартовой точкой стало отдельное измерение смещения центра давления стоп в двух плоскостях – фронтальной и сагиттальной – с применением двухкоординатного регистрирующего устройства. Комплексная траектория движения центра давления стоп разделялась на две проекции, которые анализировались изолированно, без учета их взаимосвязи. В качестве ключевых показателей использовались средние величины смещения центра давления во фронтальной и сагиттальной плоскостях, частота и размах колебаний, общая

протяженность стабилограмм. Впоследствии стал применяться спектральный анализ стабилограмм с использованием медленного преобразования Фурье. С появлением вычислительной техники появилась возможность анализа статокинезиограммы (СКГ). Координаты центра давления стоп определялись на основе математического ожидания координат точек СКГ. Наиболее простым и наглядным методом является анализ площади СКГ. Широкое распространение получило определение площади СКГ по 95% доверительному эллипсу, вычисление по выпуклому или вогнутому многоугольнику. Фокусировка исключительно на оценке площади СКГ имеет существенные ограничения. Площадь крайне нестабильна, экспоненциально увеличивается со временем и обладает большой вариабельностью у одного и того же человека при повторных замерах. Не является надежным показателем. Длина статичной кривой голеностопного сустава (СКГ): является вторым основным показателем. Средний радиус отклонения ЦД - третий показатель. Средняя скорость перемещения ЦД (Длина СКГ / Время исследования) - наиболее информативный показатель. Преимущество заключается в нормировке по времени и отражении средней характеристики динамики перемещения ЦД стоп. Информативность данного показателя вытекает из нормированности по времени и отражения средней характеристики динамики перемещения ЦД стоп.

Векторный анализ статокинезиограммы повысил достоверность стабилометрической диагностики по сравнению с классическими алгоритмами анализа траектории перемещения ЦД человека.

Компьютерная стабилометрия включает дискретную регистрацию координат ЦД стоп, 40-50 Гц, аналого-цифровое преобразование и последующую обработку данных специальной программой. СКГ рассматривается как последовательность координат ЦД [14].

Первым попытался проанализировать весь массив данных СКГ К.-Н. Mauritz. Этапы анализа заключались в следующем:

- первая попытка анализа всего массива данных СКГ.
- центр системы координат помещается в центр СКГ (точка математического ожидания).

- плоскость делится на 16 секторов (Рисунок 1.3).
- вычисляется среднее расстояние от центра СКГ до точек в каждом секторе.
- строится круговая гистограмма ("роза ветров"), показывающая преобладающие направления отклонений.

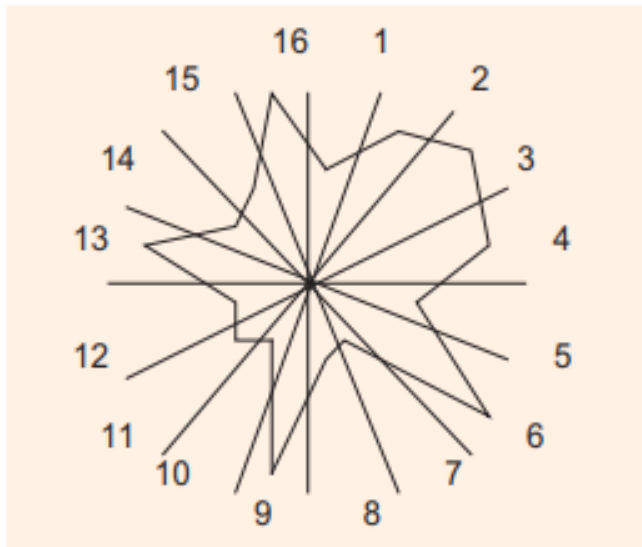


Рисунок 1.3 – 16 секторов

T. Okuzono построил круговую гистограмму по другому принципу:

1. Соединение точек СКГ: дискретные точки СКГ соединяются между собой, образуя последовательность векторов с длиной и направлением.
2. Вектора в системе координат: вектор помещается начальной точкой в центр искусственной системы координат.
3. Секторы: плоскость разделена на 18 секторов по 20 градусов каждый.
4. Средняя длина векторов: рассчитывается средняя длина векторов, попавших в каждый сектор.
5. Векторная СКГ: строится векторная СКГ, отличающаяся от обычной СКГ.

Типы векторной СКГ у здоровых лиц по *T. Okuzono*:

- центростремительный *centripetal*- диффузный *diffuse*)
- переднезадний *antero-posterior*
- мультицентрический *multicentric*
- латерально-колебательный *lateral-swaying*)

- более стабильный при закрытых глазах *more stable-with eyes closed*

Связь с патологиями: периферические поражения вестибулярной системы, увеличение латеральных колебаний в векторной СКГ.

Центральные поражения: увеличение колебаний в переднезаднем направлении. Расчет величины и направления смещения ЦД проводится безотносительно математического центра СКГ.

Длина векторов L отражает линейную скорость перемещения ЦД. Метод отображает преобладание скорости перемещения ЦД в определенных направлениях. Несмотря на более чем 30-летнюю историю, методы *K.-H. Mauritz* и *T. Okuzono* векторного анализа не получили широкого распространения в клинической практике и не были усовершенствованы авторами. [16,17,18,19].

Введено в рассмотрение 19 векторных параметров. Средняя линейная скорость, рассчитанная на основе векторов пространственной кардиограммы, оказалась сопоставима с традиционным способом вычисления средней скорости – как отношение общей длины кардиограммы ко времени записи. Параметр определялся как сумма значений линейной скорости каждого вектора, разделенная на их общее число, и измерялся в мм/с. В дополнение к анализу средней линейной скорости, была сделана попытка создания комплексного векторного показателя, основанного на функции распределения векторов линейной скорости. Показатель получил название «Качество функции равновесия» (КФР). Для расчета строилась векторограмма в координатах линейной скорости (Рисунок 1.4). Множество вершин векторов делилось на n областей кольцами одинаковой площади (Рисунок 1.5).

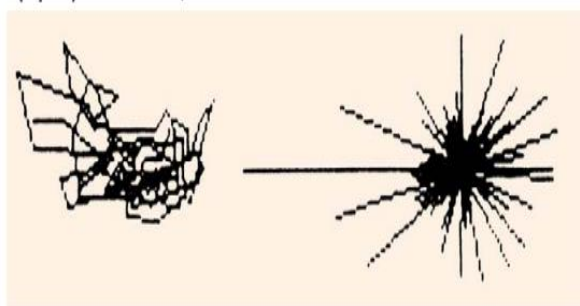


Рисунок 1.4 – Векторограмма

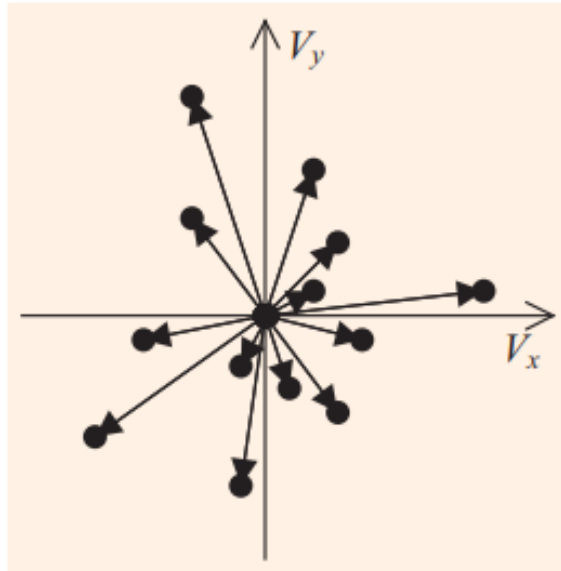


Рисунок 1.5 – Вершины векторов

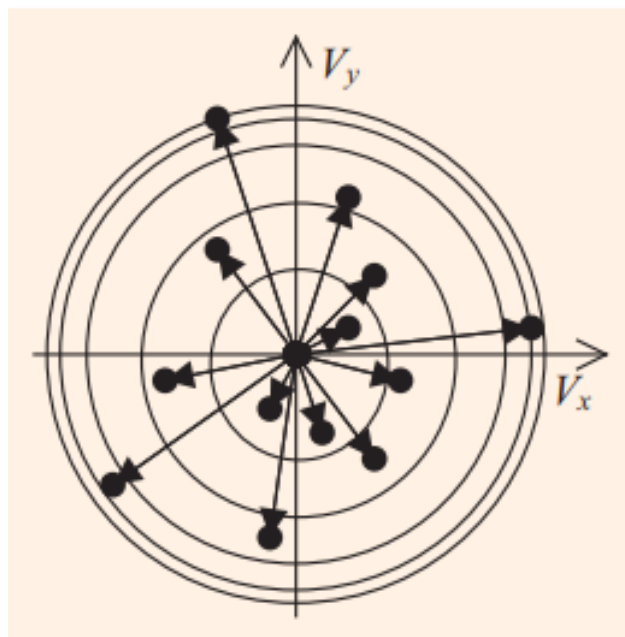


Рисунок 1.6 – Облако вершин векторов

Для поддержания работоспособности космонавтов во время космических полетных экспедиций бортовые специалисты анализируют обширные объемы информации о физическом состоянии, начиная с момента отбора и заканчивая окончанием карьеры. Сведения охватывают углубленные медицинские осмотры, разнообразные функциональные и нагрузочные испытания, широкий спектр

лабораторных анализов, проводимых как в периоды между полетами, так и непосредственно на орбите.

Методика позволяет тщательно контролировать динамику состояния работоспособности космонавта на протяжении периода полетного задания, разрабатывать рекомендации по коррекции режима труда и отдыха во время подготовки к космическим экспедициям, принимать решения о прекращении летной деятельности по медицинским соображениям. Тем не менее, невозможно оценить долгосрочное воздействие факторов космического полета на здоровье - требуется сбор медицинских данных о космонавтах на протяжении жизни после завершения полетов.

Подобный медицинский проект в настоящее время развернут в США в рамках программы «Пожизненное наблюдение за состоянием здоровья космонавтов». Программа стала продолжением и развитием научно-исследовательской работы «Продолжительное исследование здоровья космонавтов», проводившейся в 1992-2010 гг. В России исследования отсроченного влияния факторов космического полета на организм космонавтов долгое время не проводились и были начаты в 2013 г. с открытием программы «Долголетие» в НИИ космической медицины ФГБУ ФНКЦ ФМБА России.

Основной целью исследования стало изучение состояния здоровья космонавтов, завершивших летную деятельность, для оценки отсроченного влияния космических полетов на организм человека [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Для решения поставленной цели были сформулированы основные задачи исследования:

- Анализ неблагоприятных факторов космического полета и заболеваемости космонавтов на борту космических объектов;
- Разработка программы первичного углубленного медицинского обследования космонавтов, завершивших летную деятельность;
- Сбор медицинских данных о состоянии здоровья космонавтов, завершивших летную деятельность;

- Сравнительный анализ структуры заболеваемости космонавтов, совершивших полеты в космос различной продолжительности, с космонавтами, не летавшими в космос, и среднестатистической заболеваемостью [26].

1.4 Обзор математических методов обработки данных

В настоящее время для анализа стабิโลграмм в программных комплексах повсеместно используется традиционный метод преобразования Фурье. Спектральный Фурье-анализ имеет ряд существенных недостатков: предполагает линейность исследуемой системы и стационарность анализируемых данных. Для более точной оценки параметров стабิโลграммы предлагается использовать преобразование Гильберта-Хуанга. Метод основан на формировании спектра Гильберта посредством эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД). ЭМД, предложенная Норденом Хуангом в 1998 году, позволяет разложить сигналы сложной структуры на эмпирические моды (ЭМ). Основная идея метода заключается в формировании базисных функций сигнала, адаптирующихся к входным данным. Важным преимуществом ЭМД является возможность применения к исходным данным любого типа.

Задача состоит в разделении сигнала стабิโลграммы на ЭМ, последующем использовании для построения спектра Гильберта и определении параметров спектрограммы. В поддержании равновесия у человека участвуют вестибулярная, зрительная и сенсорная системы. В процессе поддержания равновесия и вертикального положения тела возникают незначительные колебательные движения, практически невидимые глазу. Колебания отражаются на стабิโลграмме и обладают специфическими физическими характеристиками. Для частотно-временного анализа стабิโลграммы формируется спектр Гильберта, применяемый к ЭМ. Для построения необходимо знать мгновенную энергию и частоту, рассчитываемые по определенным формулам:

$$e = |A(t)|^2, \quad (1.1)$$

где $A(t)$ – аналитический сигнал.

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

где $\varphi(t)$ – фаза сигнала.

Основная идея ЭМД заключается в декомпозиции входящего сигнала на ряд составляющих, где каждая отдельная компонента представляет собой колебание с уникальной, характерной для исходного сигнала частотой, на остаточный член, отражающий общую направленность (тренд) в данных.

Проведение ЭМД и построение спектра Гильберта осуществляется с использованием специализированного модуля в среде *MATLAB*. Для традиционного анализа спектральных характеристик, основанного на преобразовании Фурье, вычисляются стандартные стабิโลграфические параметры [27-29].

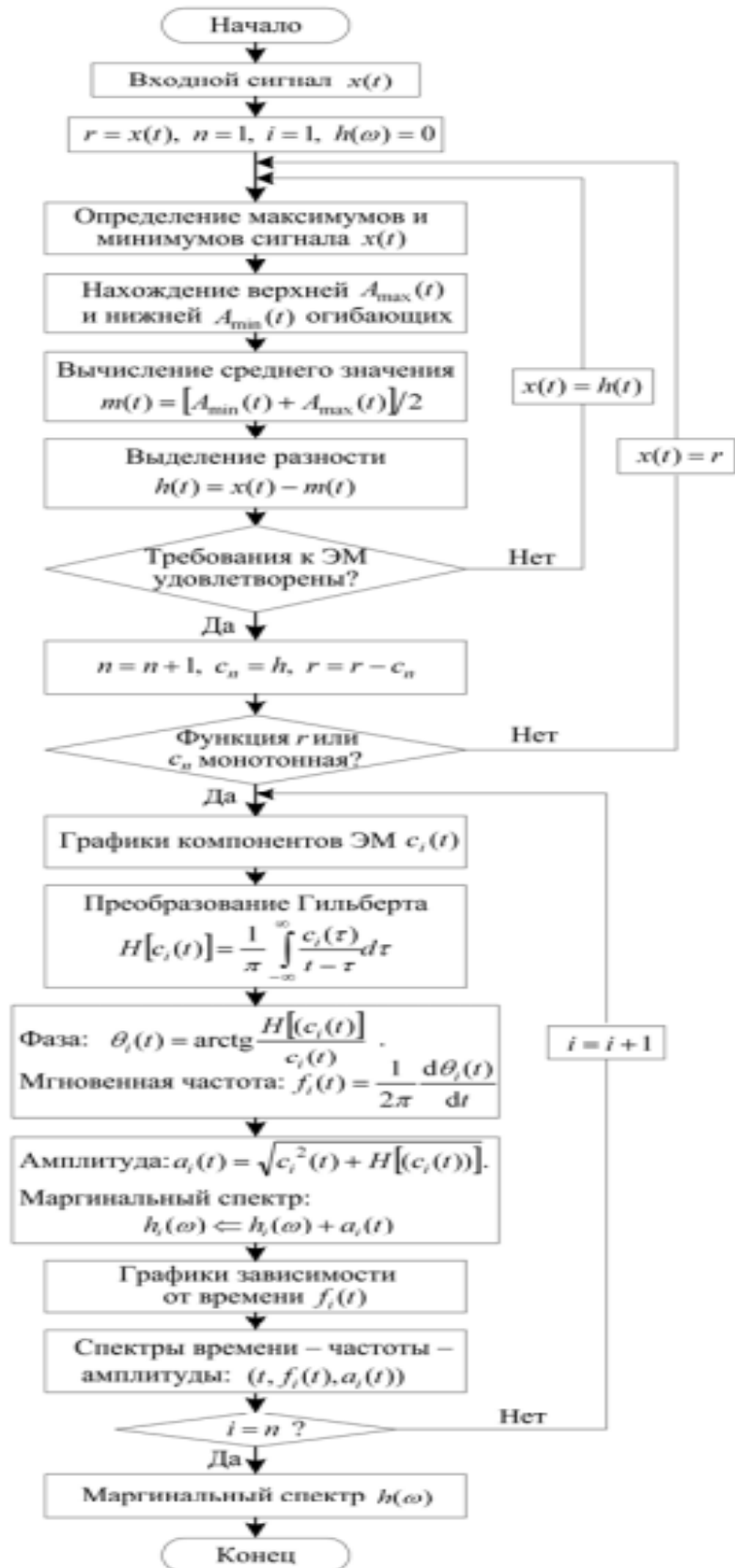


Рисунок 1.6 – Блок-схема алгоритма, реализующего преобразование Гильберта – Хуанга [30]

1.5 Методы экспериментальных исследований по системам реабилитации

Методика эксперимента (Таблица 1.2), включающая 16 тестов различной сложности для контрольной оценки перемещения центра тяжести испытуемого. Эксперимент разработан на базе ГНЦ РФ ИМБП РАН.

Таблица 1.2 – Методика эксперимента

№ п.п.	Время	Описание/комментарий
1	2:49 - 3:49 (60 секунд)	твёрдая опора; глаза открыты; без нагрузки; без стимуляции
2	5:19 - 6:20 (61 секунда)	твёрдая опора; глаза закрыты; без нагрузки; без стимуляции
3	9:54 - 10:55 (61 секунда)	мягкая опора; глаза открыты; без нагрузки; без стимуляции
4	11:34 - 12:35 (61 секунд)	мягкая опора; глаза закрыты; без нагрузки; без стимуляции
5	15:13 - 18:14 (3 мин 1 сек)	мягкая опора; глаза открыты; без нагрузки; стимуляция 15:34 - 15:43, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 30 секунда) 16:14 - 16:24, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 71 секунда) 16:54 - 17:04, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 111 секунда) 17:34 - 17:44 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)

Таблица 1.2 – Продолжение

6	20:09 - 23:20 (3 мин 11 сек)	мягкая опора; глаза закрыты; без нагрузки; стимуляция 20:30 - 20:39, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 30 секунда) 21:20 - 21:29, (метка 3 = 71 секунда; метка 4 = 80 секунда) 22:00 - 22:10, (метка 5 = 111 секунда; метка 6 = 121 секунда) 22:40 - 22:49 (метка 7 = 151 секунда; метка 8 = 160 секунда)
7	36:30 - 39:31 (3 мин 1 сек)	твёрдая опора; глаза открыты; без нагрузки; стимуляция 36:51 - 37:01, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 31 секунда) 37:31 - 37:41, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 71 секунда) 38:11 - 38:21, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 111 секунда) 38:51 - 39:01 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)

Таблица 1.2 – Продолжение

8	48:06 - 51:07 (3 мин 1 сек)	твёрдая опора; глаза закрыты; без нагрузки; стимуляция 48:27 - 48:38, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 32 секунда) 49:08 - 49:18, (метка 3 = 62 секунда; метка 4 = 72 секунда) 49:47 - 49:58, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 112 секунда) 50:27 - 50:38 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 152 секунда)
9	1:01:31 - 1:02:32 (61 секунды)	твёрдая опора; глаза открыты; с нагрузкой; без стимуляции
10	1:07:14 - 1:08:14 (60 секунда)	твёрдая опора; глаза закрыты; с нагрузкой; без стимуляции
11	1:11:18 - 1:14:18 (3 мин 0 сек)	твёрдая опора; глаза открыты; с нагрузкой; стимуляция 1:11:39 - 1:11:49, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 31 секунда) 1:12:19 - 1:12:29, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 71 секунда) 1:12:58 - 1:13:08, (метка 5 = 100 секунда; метка 6 = 110 секунда) 1:13:39 - 1:13:49 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)

Таблица 1.2 – Продолжение

12	1:28:26 - 1:31:27 (3 мин 1 сек)	твёрдая опора; глаза закрыты; с нагрузкой; стимуляция 1:28:47 - 1:28:57, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 31 секунда) 1:29:27 - 1:29:37, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 71 секунда) 1:30:07 - 1:30:17, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 111 секунда) 1:30:47 - 1:30:57 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)
13	1:33:18 - 1:34:19 (61 секунда)	мягкая опора; глаза открыты; с нагрузкой; без стимуляции
14	1:34:58 - 1:35:59 (61 секунда)	мягкая опора; глаза закрыты; с нагрузкой; без стимуляции
15	1:38:51 - 1:41:52 (3 мин 1 сек)	мягкая опора; глаза открыты; с нагрузкой; стимуляция 1:39:12 - 1:39:23, (метка 1 = 21 секунда; метка 2 = 32 секунда) 1:39:52 - 1:40:03, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 72 секунда) 1:40:32 - 1:40:43, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 112 секунда) 1:41:12 - 1:41:22 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)

Таблица 1.2 – Продолжение

16	1:45:03 - 1:48:04 (3 мин 1 сек)	мягкая опора; глаза закрыты; с нагрузкой; стимуляция 1:45:26 - 1:45:35, (метка 1 = 23 секунда; метка 2 = 32 секунда) 1:46:04 - 1:46:14, (метка 3 = 61 секунда; метка 4 = 71 секунда) 1:46:44 - 1:46:54, (метка 5 = 101 секунда; метка 6 = 111 секунда) 1:47:24 - 1:47:34 (метка 7 = 141 секунда; метка 8 = 151 секунда)
----	------------------------------------	--

В результате экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

- 1) Вследствие действия перегрузок у испытуемого наблюдается тахикардия (Рисунок 1.7);
- 2) Вследствие действия нагрузок и стимуляции, центр тяжести начинает отклоняться от начала координат (Рисунок 1.8-1.12);
- 3) Углы отклонения на мягкой стабильной платформе больше, чем углы отклонения на твердой.



Рисунок 1.7 – Пульс

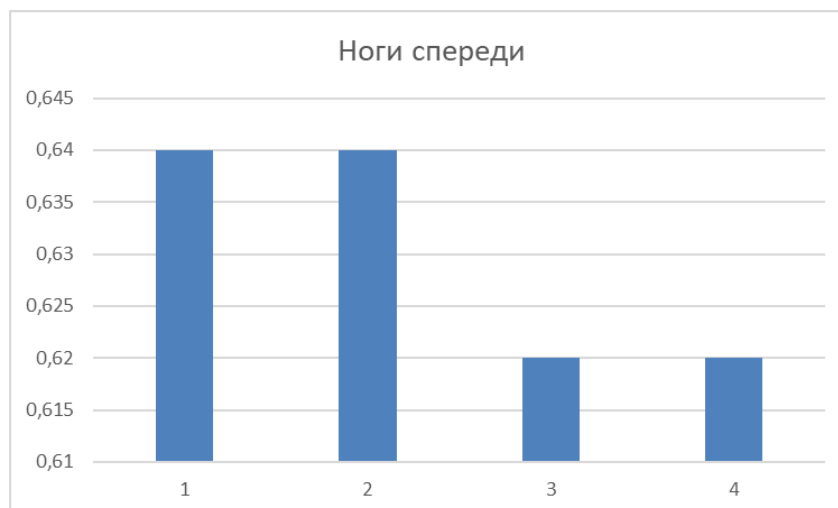


Рисунок 1.8 – Нагрузка на ноги спереди

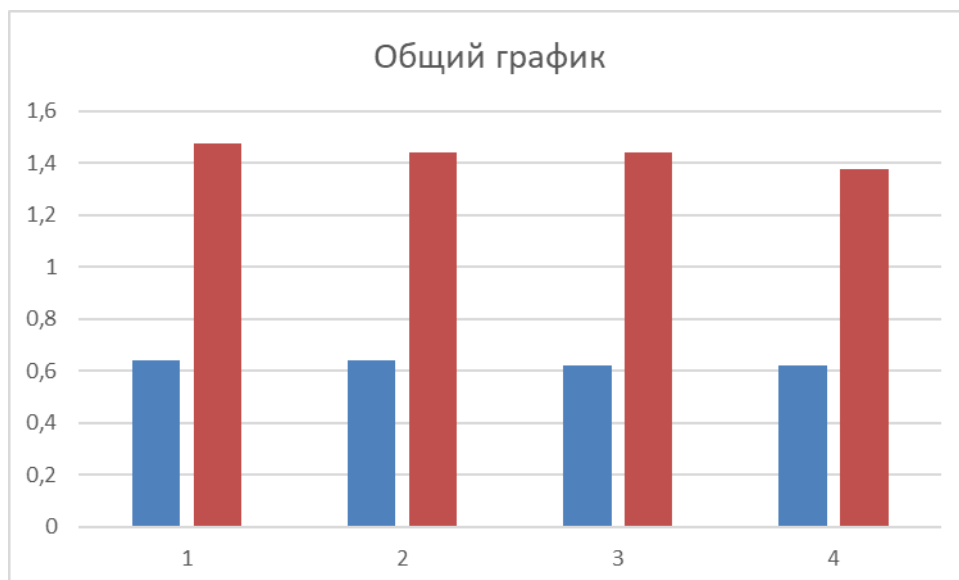


Рисунок 1.9 – Общая нагрузка на ноги спереди и сзади

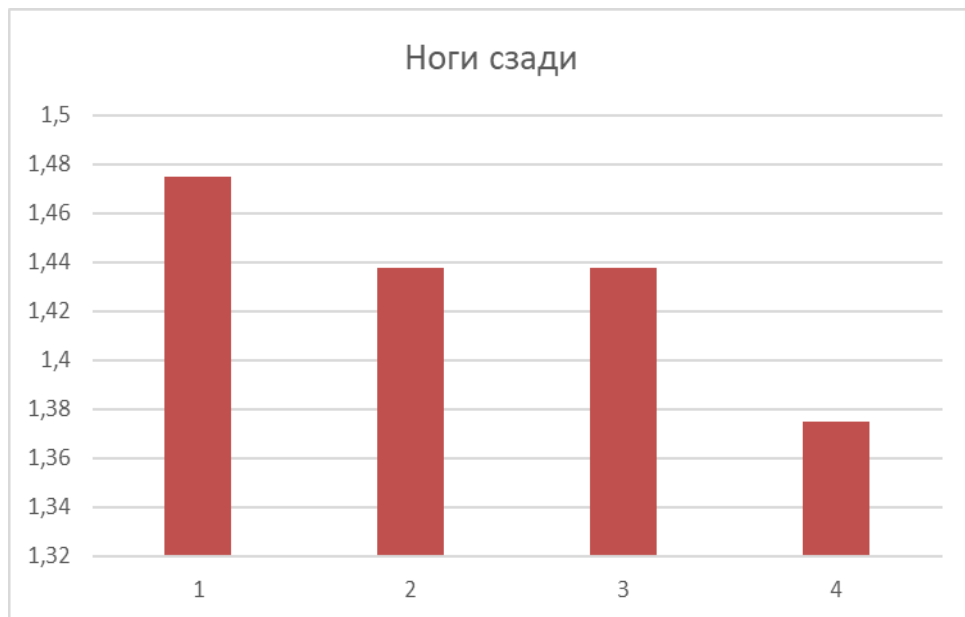


Рисунок 1.10 – Нагрузка на ноги сзади

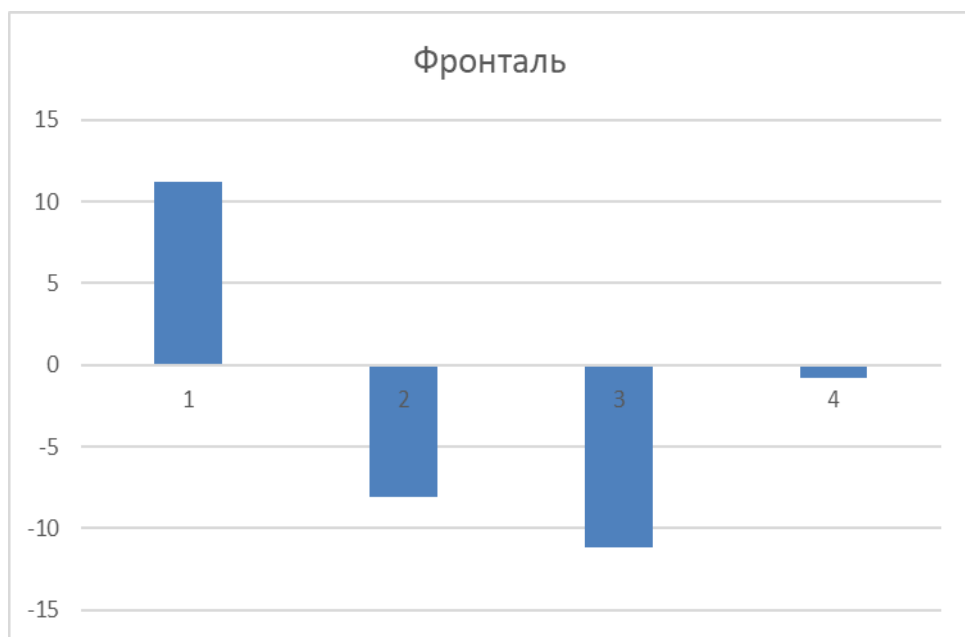


Рисунок 1.11 – Давление на платформу по фронтали

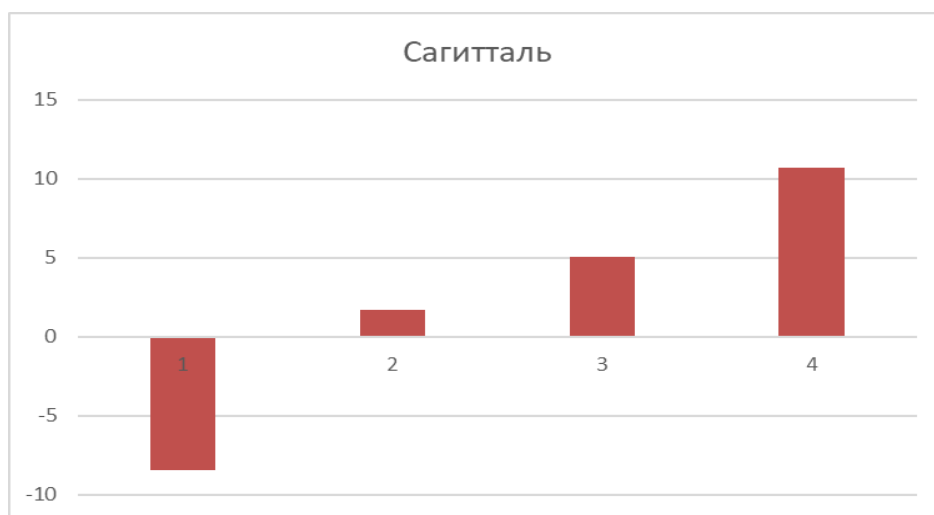


Рисунок 1.12 – Давление на платформу по сагиттали

По обработке экспериментальных данных получены следующие результаты: Проводилось сравнение выборок данных пульса в покое между стимуляциями (до 1-ой стимуляции, между 1-ой и 2-ой стимуляциями, между 2-ой и 3-ей стимуляциями, между 3-ей и 4-ой стимуляциями, после 4-ой стимуляции), всего 5 выборок в записи эксперимента. Выборки брались в записях, где на эластичные элементы была установлена нагрузка, и производилась стимуляция. Поочерёдно производилось сравнение 1-ой выборки, как исходной, со всеми остальными (2,3,4,5). (Малое количество выборок совпало по медианным значениям с соответствующими контрольными записями).

Математическая модель

$$M = F * l = mgl, \quad (1.3)$$

где l - длина участка тела.

Составим суммарное уравнение действия нагрузки на ноги испытуемого в условиях действия вектора земной гравитации:

$$mgl_1 + mgl'_1 + mgl_2 + mgl'_2 + mgl_3 + mgl'_3 = \sum M_i + \vec{G} \quad (1.4)$$

Дополнительные граничные условия:

- 1) Проекция сегментов тела на ось OY равна нулю
- 2) Центр тяжести испытуемого перемещается по часовой стрелке.

Учитывая углы отклонения $\cos \alpha = \frac{OX}{l}$, получим:

$$mg \frac{OX}{\cos \alpha} + mg \frac{OX'}{\cos \alpha} + mg \frac{OX_1}{\cos \alpha} + mg \frac{OX'_1}{\cos \alpha} + mg \frac{OX_2}{\cos \alpha} + mg \frac{OX'_2}{\cos \alpha} = \sum M_i + \vec{G} \quad (1.5)$$

Определение масс сегментов по уравнению множественной регрессии

Уравнение имеет вид:

$$Y = B_1 + X_1 B_2 + X_2 B_3, \quad (1.6)$$

где

Y – вес сегмента;

B_1 – первый коэффициент;

X_1 – вес тела;

B_2 – второй коэффициент;

X_2 – рост;

B_3 – третий коэффициент.

$$Y_1 = -0.829 + 86 * 0.0077 + 191 * 0.0073 = 1.2275 \quad (1.7)$$

$$Y_2 = -1.592 + 86 * 0.03616 + 191 * 0.0121 = 3.82886 \quad (1.8)$$

$$Y_3 = -2.649 + 86 * 0.1463 + 191 * 0.0137 = 12.4 \quad (1.9)$$

$$\sum M_i = 1116.25 + \vec{G} \quad (1.10)$$

У испытуемого отклоняется центр тяжести от начала координат вследствие нагрузок и стимуляции, меняется масса сегментов тела. И соответственно меняется перераспределение крови по бедру, голени и стопе. Данная математическая модель позволяет рассчитать также суммарный момент действующий на ноги при воздействии внешних факторов [31].

1.6 Система поддержки принятия решений (СППР) медико-технического обеспечения для адаптации на Лунной базе

Для эффективного одновременного отслеживания состояния работоспособности членов внекорабельной деятельности (ВКД) в различных условиях - лунная поверхность, жилой модуль, мобильный лунный комплекс - необходимо внедрение автоматизированной системы поддержки принятия решений (СППР). Система в автоматическом режиме осуществляет контроль и реагирует на опасности, угрожающие здоровью космонавтов. Оптимальное местоположение СППР является сложной задачей. Размещение исключительно в Центре управления полетами (ЦУП) делает систему неэффективной при потере связи с космонавтом. Аналогичные трудности возникают при размещении только на обитаемой лунной базе или в луноходе [32, 33, 34, 35, 36, 37].

Возможен следующий вариант распределения модулей автоматизированной системы: часть решающих модулей СППР интегрируется непосредственно в скафандр космонавта, другая часть размещается на лунной базе или орбитальной станции, а основная часть остается в ЦУП (Рисунок 1.13). В зависимости от качества связи контроль и анализ медицинских данных осуществляется как наземной командой ЦУП, так и космонавтами, находящимися на окололунной станции, в посадочном модуле, на лунной базе или в луноходе. Информация оперативно распределяется между всеми участниками. Существует принцип распределения функций и резервирования данных, который применялся еще при первых выходах в открытый космос. Космонавт, осуществляющий ВКД, поддерживает связь с элементами системы контроля. На каждом этапе ВКД устанавливаются приоритеты диспетчеризации для одного из звеньев, но в случае изменения обстоятельств, например, при сбоях связи, автоматически переключаются. При полном отсутствии связи автономный носимый блок космонавта полностью обеспечивает функции контроля, анализа и оценки медицинских данных [38].

При внекорабельной деятельности (ВКД) ключевые показатели жизнеобеспечения и соответствующие датчики для отслеживания останутся прежними. Сюда входят параметры: электрокардиограммы (ЭКГ), сердечный ритм, число дыхательных движений, температура тела и контроль расхода энергии.

С регистрацией традиционных параметров, целесообразно включить в систему датчики, фиксирующие двигательную активность: акселерометры, гироскопы, сенсоры давления. Обусловлено значительной статической и динамической нагрузкой на мускулатуру, возникающей ввиду изменений в кинематике движений космонавта на лунной поверхности. Причиной является сниженная гравитация (0,16 от земной), изменение центра тяжести при использовании скафандра, недостаточное сцепление обуви с поверхностью. Происходит влияние на позу и способ передвижения, накладывает ограничения при перемещении по наклонным и неровным участкам. Регистрация указанных параметров особенно важна в первых экспедициях, что позволит скорректировать требования к скафандрам и оборудованию, создать рекомендации по техникам выполнения задач при ВКД.

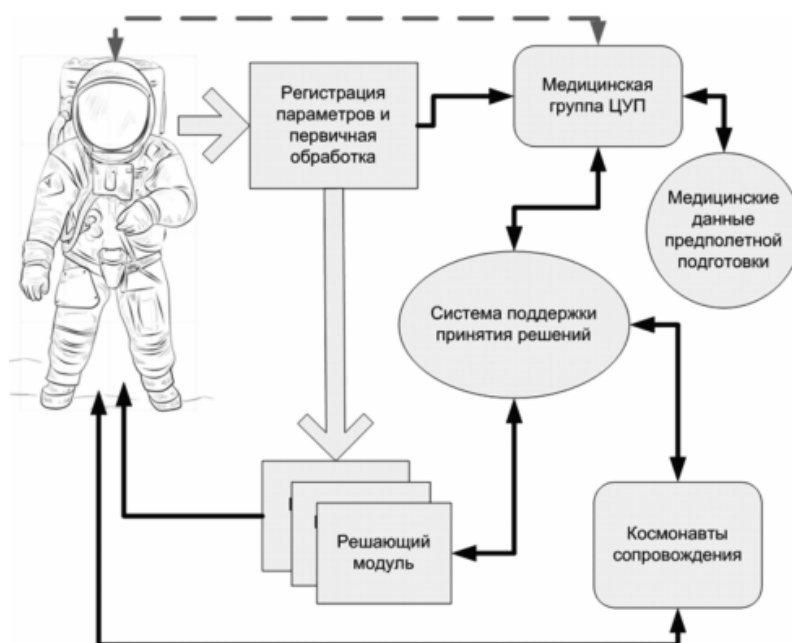


Рисунок 1.13 – Модули автоматизированной СППР

1.7 Состав конструкции и проектирования бортового тренажерного комплекса

Разработка устройства, благодаря новой конструкции и материалам, позволит повысить эффективность восстановления опорно-двигательного аппарата.

Принцип действия стабилоплатформы основывается на измерении специальными датчиками вертикальных сил, прикладываемых размещенным на платформе человеком. Данное устройство собирает информацию о работе опорно-двигательной и нервной системы при выполнении испытуемым упражнений. Информация, поступающая с сенсорных датчиков, быстро обрабатывается и выводится на монитор.

Нетвердая опора, восстанавливающая позную функцию испытуемого при наличии вектора гравитации за счет волны колебаний внутренней структуры платформы. Узел обратной связи заставляет человека изменять положение центра тяжести и помещать в эпюру нормального наземного положения центра тяжести. Задействованы мышечные, сосудистые и нервные системы, отвечающие за положение человека в пространстве.

Ключевым электронным элементом стал микроконтроллер *ATmega328*, реализованный на базе платформы *Arduino Uno R3*. Плата обладает необходимым числом дискретных и аналоговых портов ввода/вывода, интегрированным АЦП и ЦАП, средой программирования, близкой к *C++*. В роли аналого-цифрового преобразователя (АЦП) задействована плата *HX711*. 24-битный АЦП *HX711* используется в измерительных системах, весовом оборудовании, и совместим с *Arduino* и микроконтроллерами, где требуется высокая точность измерений от датчиков. Для функционирования необходимо соединить АЦП *HX711* с датчиками в мостовой конфигурации, контроллером *Arduino* и обеспечить питание. АЦП *HX711* оборудован двумя коннекторами для подключения к датчикам, разъемом для соединения с контроллером и портом питания. Питание АЦП *HX711* может осуществляться как от *Arduino* контроллера, так и от внешнего источника.

В разработанной системе в качестве сенсора силы используется датчик на 30 г. В конструкции стабиллоплатформы задействованы четыре подобных датчика. Датчик на 30 г – тензорезисторный датчик, который может служить основой для весов, датчиков давления или концевых выключателей. Стабиллоплатформа и весы имеют практически идентичную электронно-механическую структуру. Ключевое различие заключается в алгоритмах обработки цифровых данных. В основу конструкции заложена биологическая обратная связь, интегрированная в блок управления.

Для оцифровки сигнала с каждого датчика применен отдельный АЦП. Все четыре АЦП подключены к микроконтроллеру. Для организации питания АЦП дополнительно использована макетная плата. Для минимизации влияния электромагнитных помех при сборке устройства применяются экранированные кабели. Конструкция обеспечивает прозрачность и удобный доступ к каждому электронному компоненту стабиллоплатформы [39].

Основным компонентом реабилитационных программ на данном оборудовании является тренировка равновесия и баланса испытуемого в вертикальном положении. Использование тренировочных протоколов, в которые входят технологии биоуправляемой обратной связи на стабиллоплатформах не только способствует улучшению устойчивости, но и приводит к уменьшению асимметрии вертикальной позы и шага.

Нетвердая опора состоит из основного корпуса и фиксированных к нему силовых датчиков, которые являются одновременно и элементами опоры. Усилие, приходящееся на каждый датчик, позволяет вычислять проекцию общего центра масс тела на плоскость опоры. В основе своей конструкции имеется обратная связь через зрительный канал испытуемого. В основе конструкции используется мягкий наполнитель внутри пластикового корпуса опоры. В качестве мягкого наполнителя предложено использовать пенопластовые шарики.

1.8 Постановка задачи исследования

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

Для достижения цели сформулированы следующие основные 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.

Заключение по Главе 1

Разработка бортового тренажерного комплекса с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавтов является одной из ключевых задач для адаптационно-

реабилитационных мероприятий экипажа в условиях лунной гравитации и земных исследований. Выполняются требования впервые разработанного бортового тренажерного комплекса: простой и удобный для космонавта, удовлетворяет требованиям по точности измерения с гарантированной вероятностью 95%.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Проектирование математического обеспечения

При разработке математического обеспечения для бортового тренажерного комплекса осуществляется создание математической модели исследуемой области информационной системы, разрабатываются способы обработки поступающей информации. Математическая модель предметной области представляет собой формализованное описание, необходимое для решения задач, стоящих перед информационной системой, с использованием строгих математических методов [40].

Ключевыми шагами в определении способа решения задач выступают:

1. Описание задачи;
2. Определение типа математической модели;
3. Формализация задачи в виде математической модели;
4. Подбор или создание подходящего метода решения;
5. Верификация метода.

На первом шаге задача описывается на обычном языке и включает: описание общей идеи, ожидаемый результат, входные данные, ограничения, относящиеся к входным данным и результату.

Второй шаг заключается в выборе подходящего вида математической модели. Различают аналитические и имитационные модели:

1) Аналитические модели подразумевают создание программного обеспечения исключительно с использованием формальных математических языков и требуют формального описания объектов программного обеспечения и связей между ними.

2) Имитационное моделирование – воспроизведение процессов, происходящих в программном обеспечении, с искусственной симуляцией

параметров, влияющих на процессы, обычно с применением бортовых вычислительных средств.

Выбор подходящего языка формализации обуславливается типом решаемой задачи. Задачи можно классифицировать на логические, вычислительные и оптимизационные.

1. В логических задачах процесс нахождения решений базируется на принципах логики, моделях, теории множеств, дискретной математике, теории графов и математической логике. При решении задач на основе предоставленных данных и установленных утверждений выявляется перечень параметров, необходимых для принятия обоснованного решения. Исходные данные и результаты решения представлены в виде совокупностей элементов и связей. Утверждения формулируются с использованием логических выражений, к примеру, с применением языка предикатов первого порядка.

2. В вычислительных задачах определяются формулы, необходимые для расчета параметров, требующихся для принятия решений.

3. Оптимизационные задачи позволяют определить наилучшее значение параметров из заданного набора допустимых значений, которые определяют конкретное управленческое решение, исходя из выбранных критериев эффективности управления.

Возникают задачи, сочетающие признаки трех вышеуказанных классов.

На третьем этапе построения формализованной модели необходимо определить перечень условных обозначений для параметров программного обеспечения. Актуально для задач оптимизации ввести обозначения для показателей эффективности решения, определить структуру целевой функции, связывающей показатели эффективности с параметрами программного обеспечения. Далее формируются ограничения, накладываемые на значения параметров в виде алгебраических или логических выражений. В завершение этапа происходит формальная постановка задачи.

На четвертом этапе осуществляется выбор метода решения задачи. Первоначально необходимо провести анализ имеющихся методов и оценить

возможность применения. Оценивается временная сложность решения задачи. Разработка нового метода решения задачи проводится в случае отсутствия подходящих существующих методов.

На этапе верификации необходимо оценить степень точности полученного решения. В случае недостаточной точности решения проводится уточнение, корректировка и калибровка используемой математической модели.

Параметры, от которых зависят решение оптимизационной задачи, делятся на два класса:

- заданные заранее известные неизменяемые параметры (опорный треугольник стопы): $a = (a_1, a_2 \dots)$;

- изменяемые параметры $x = (x_1, x_2 \dots)$ значения которых необходимо определить при решении задачи. Угол отклонения стопы на опорной системе бортового тренажерного комплекса, регистрируемый датчиком угла отклонения, а также разброс среднеквадратического отклонения по фронтальной и сагиттальной плоскостям.

Оптимальным является решение, которые предпочтительнее других. Чтобы сделать вывод об эффективности решения определяется численный критерий $c = (c_1, c_2 \dots)$ количественные связи между параметрами и критериями, т.е. целевая функция $c = W(x, a)$. Целевую функцию необходимо обратить в максимум или минимум.

Для нахождения оптимального решения последовательно выполняются этапы:

- 1) создание математической модели, описывающей задачу;
- 2) подбор или создание подходящего метода для разрешения задачи;
- 3) проверка полученного решения на примере.

При формулировке задачи необходимо определить элементы:

1. Переменные, значения которых необходимо оптимизировать в процессе решения;

2. Условия и границы задачи, определяющие допустимые значения переменных;
3. Критерии оценки решения, служащие для определения качества результата;
4. Целевая функция, устанавливающая связь между критериями оценки и переменными.

Формулировка задачи осуществляется в несколько шагов:

- описание задачи с четким определением переменных, ограничений (условий), показателей и критериев;
- составление списка используемых обозначений;
- выражение ограничений (условий) в виде уравнений и неравенств;
- формулировка целевой функции;
- окончательная формулировка задачи.

2.2 Структура алгоритмов в математическом обеспечении

Существует большое многообразие классификации алгоритмов по ряду признаков. В зависимости от базовой структуры различают алгоритмы линейные, разветвляющиеся и циклические [41].

Алгоритм называется линейным, если все действия выполняются однократно в строго определенной последовательности (базовая структура следование). На Рисунке 2.1 приведена структурная блок-схема линейного алгоритма, а на Рисунке 2.2 приведен пример линейного алгоритма для вычисления функции

$$f(x) = ax^2 + b + \cos(ax^2 + b) - e^{-ax^2 + b} \quad (2.1)$$

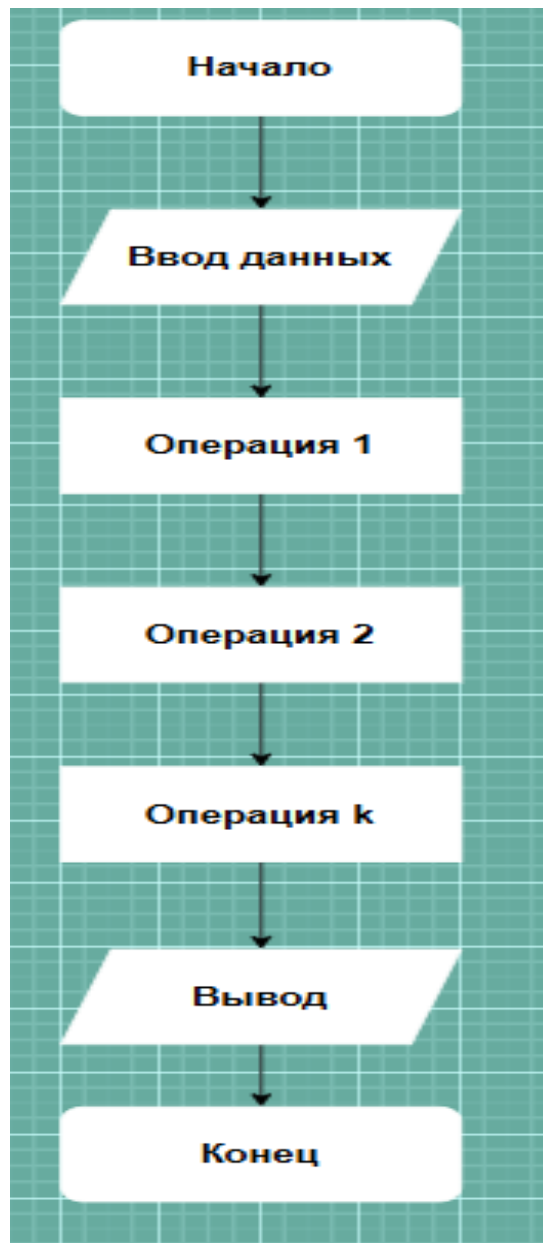


Рисунок 2.1 – структурная блок-схема линейного алгоритма

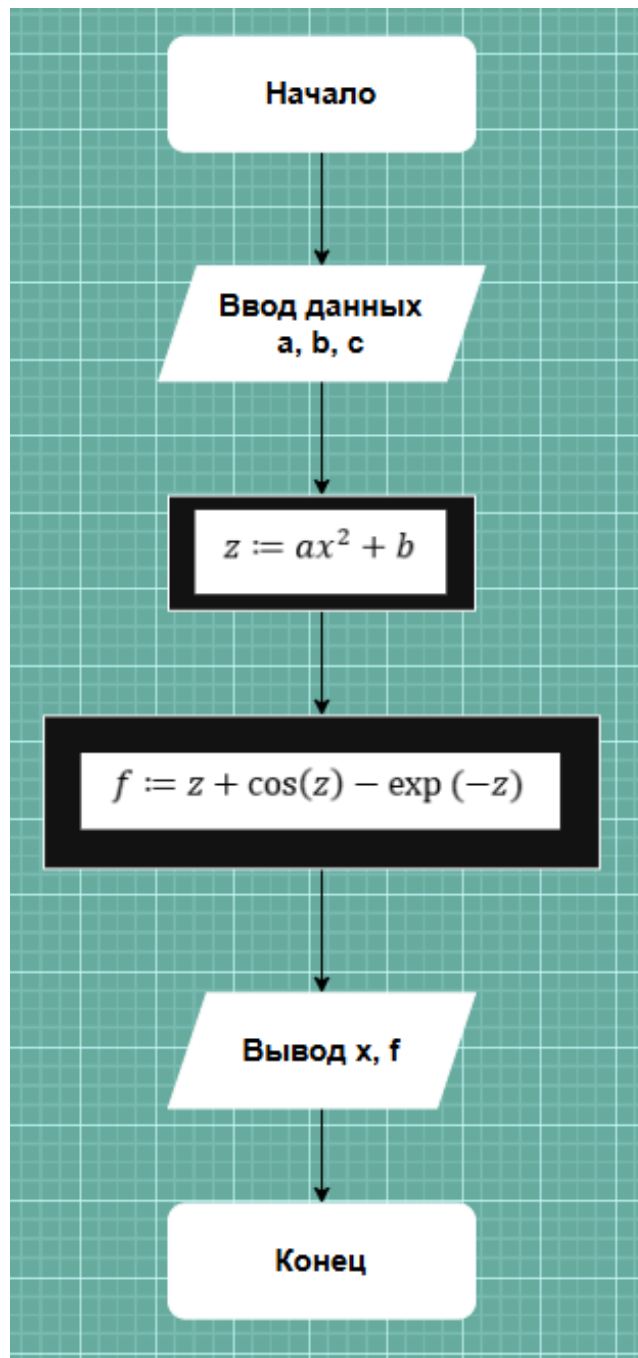


Рисунок 2.2 – пример линейного алгоритма

Алгоритм называется разветвляющимся (ветвящимся), если существует выбор одной из нескольких альтернатив последовательных действий в зависимости от исходных или промежуточных данных,- базовая структура ветвления. При ветвлении происходит однократный проход по одной из ветвей решения задачи. Признаком ветвящегося алгоритма является наличие операций условного перехода, когда происходит проверка истинности некоторого логического выражения, и в зависимости от истинности или ложности проверяемого условия выбирается

соответствующая ветвь для дальнейшей реализации алгоритма. Под логическим выражением понимается выражение, записанное с помощью операций сравнения: больше (“>”), меньше (“<”), меньше или равно (“<=”), не равно (“<>”). При составлении логических выражений, включающих составные условия, используются логические связки “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. На практике наиболее часто встречаются четыре варианта ветвления алгоритма:

1) Если-то (Рисунок 2.3)

Структура алгоритма: если условие (If)
 то операции
 конец

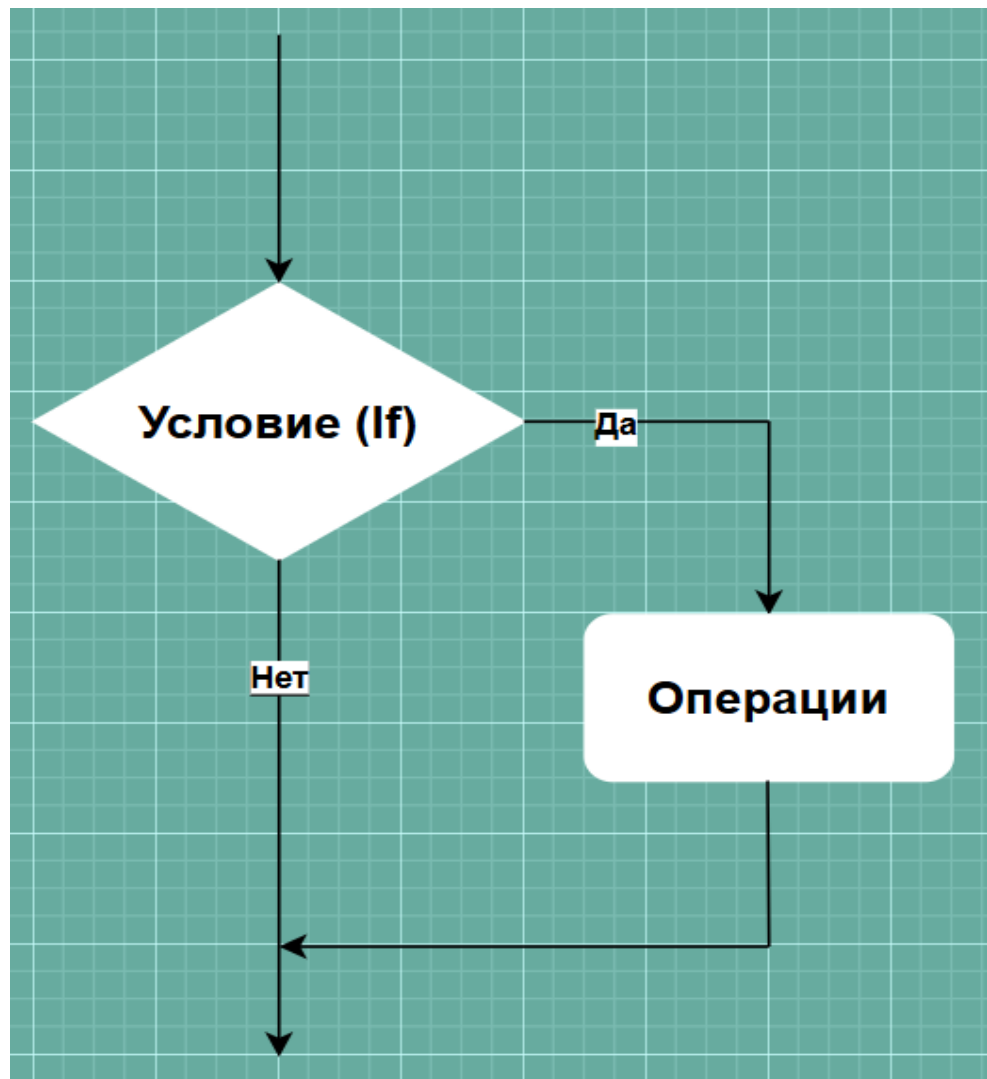


Рисунок 2.3 – Если-то

2) Если-то-иначе (Рисунок 2.4)

Структура если условия (*If*)
алгоритма: то операции 1
 иначе операции 2
 конец

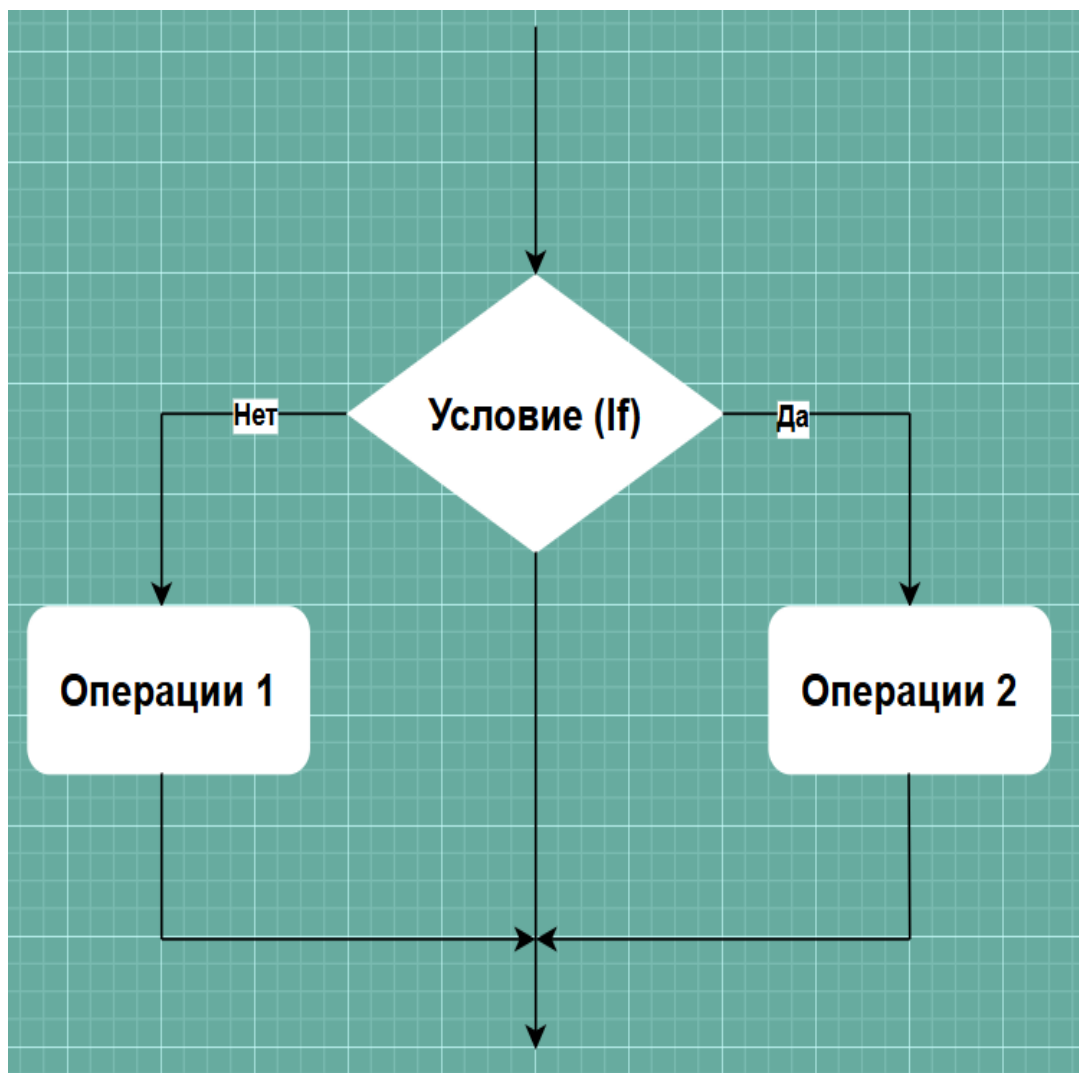


Рисунок 2.4 – Если-то-иначе

3) Выбор (Рисунок 2.5)

Структура алгоритма: выбор
при условии (*If*) 1:
операции 1
при условии (*If*) 2:
операции 2
.....
при условии *N*:
операции *N*
конец

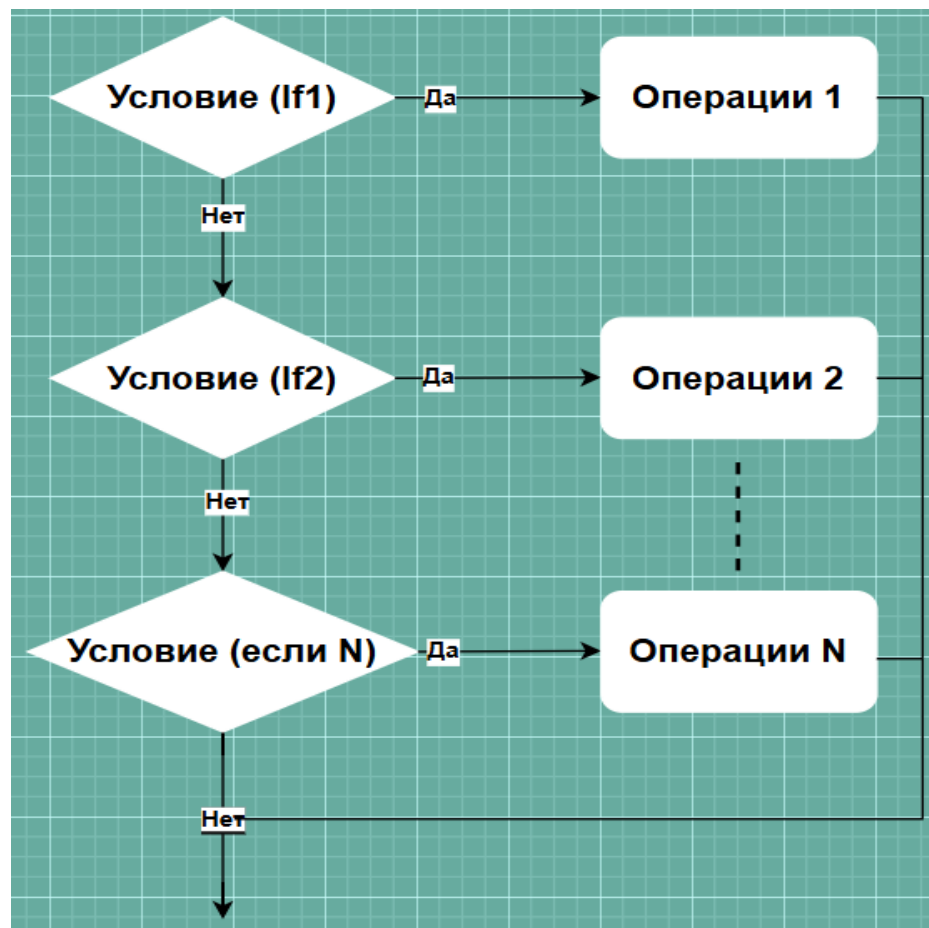


Рисунок 2.5 – Выбор

4) Выбор-иначе (Рисунок 2.6)

Структура алгоритма: выбор
 при условии (*If*) 1:
 операции 1
 при условии (*If*) 2:
 операции 2

 при условии *N*:
 операции *N*
 иначе операции *N*+1
 конец

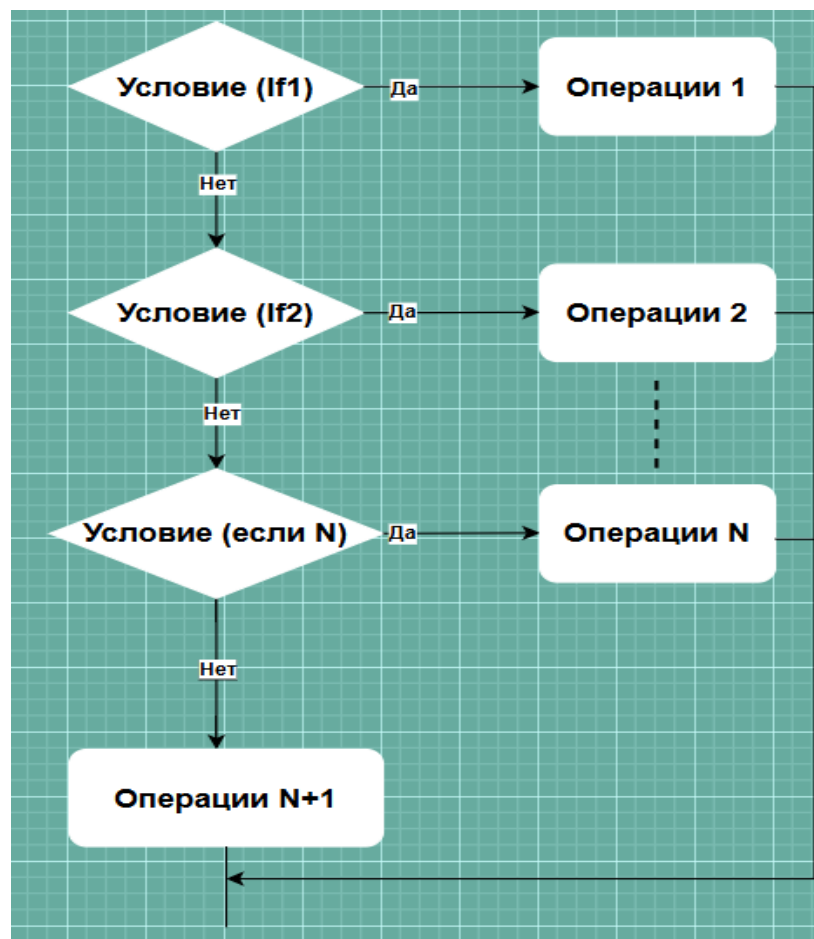


Рисунок 2.6 – Выбор-иначе

Алгоритм называется циклическим, если при каждом исполнении предписывается многократное выполнение одной последовательности действий – тела цикла (базовая структура цикл). Наиболее распространенными циклами являются:

1) Цикл **пока** с предусловием (*If*) (Рисунок 2.7)

Структура алгоритма: начало цикла **пока** условие (*If*)

тело цикла

конец

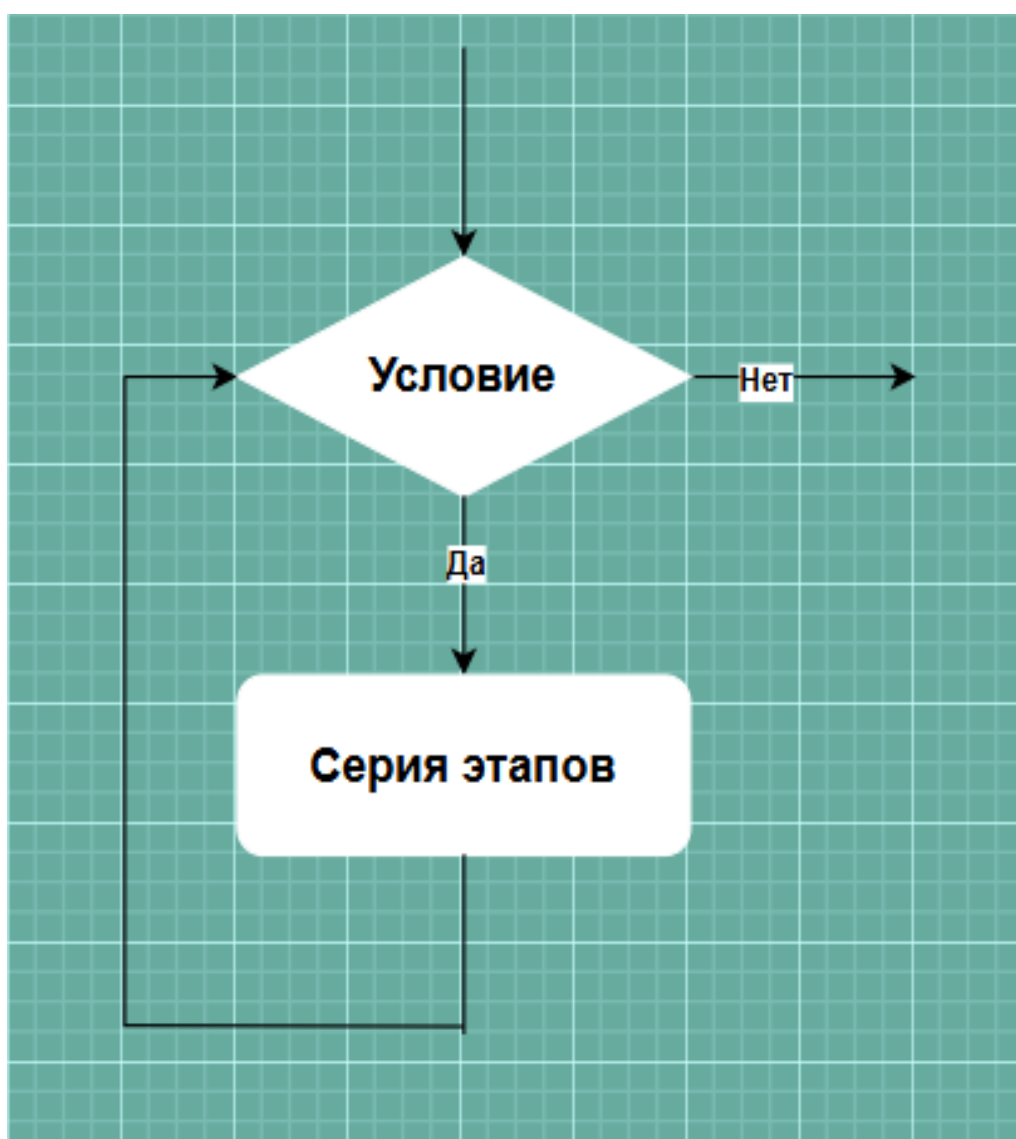


Рисунок 2.7 – Цикл **пока** с предусловием

2) Цикл "до" с постусловием (Рисунок 2.8)

Структура алгоритма: начало цикла
тело цикла
до условие (*If*)
конец

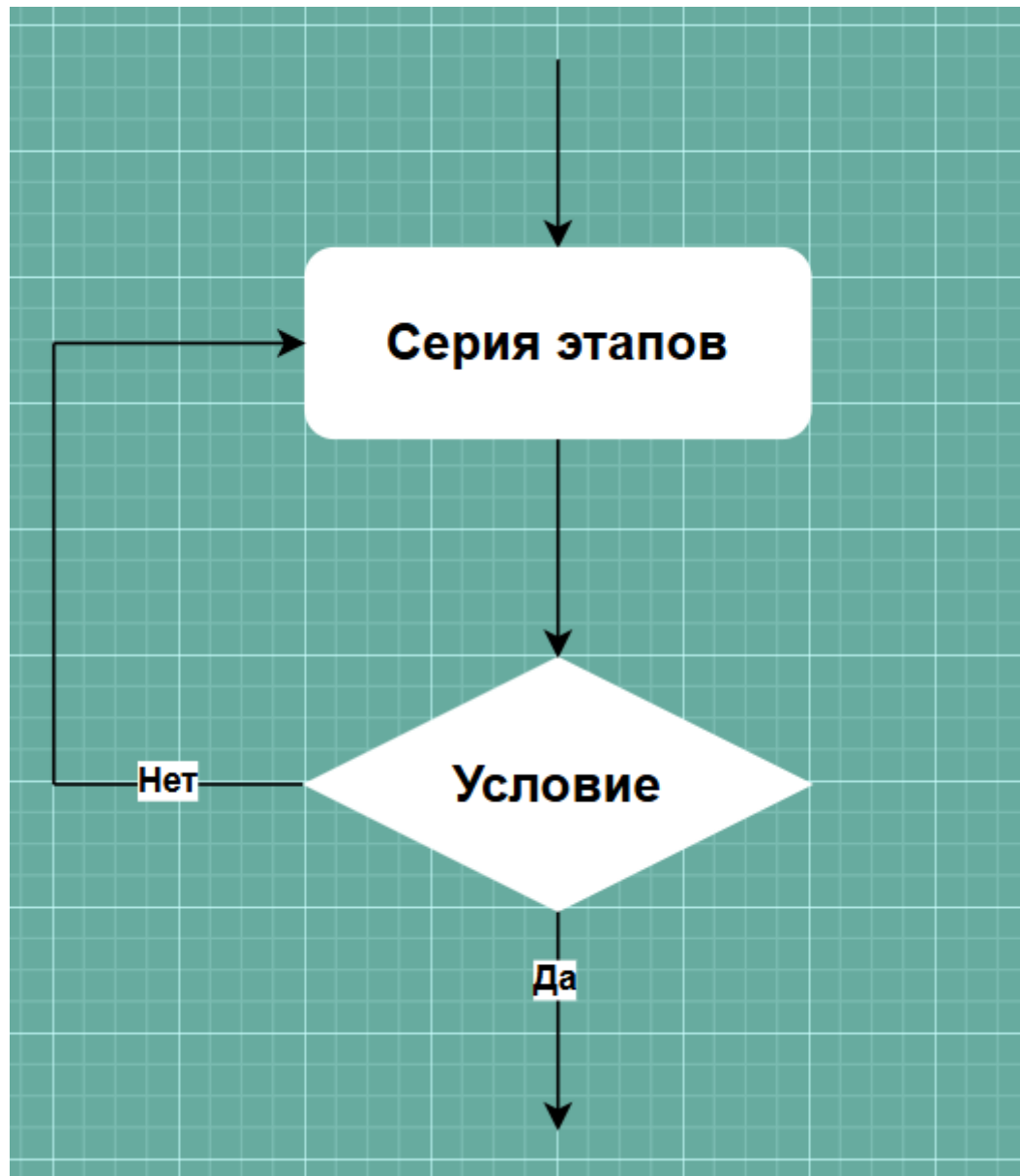


Рисунок 2.7 – Цикл "до" с постусловием

3) Цикл «для» (цикл с параметром) – предписывает выполнять тело цикла для всех значений некоторой переменной (параметра цикла) в заданном диапазоне.

Цикл "для" используется для ситуаций, когда заранее известно количество повторений некоторых действий (Рисунок 2.8).

Структура алгоритма: начало цикла для i от $N1$ до $N2$

тело цикла

конец

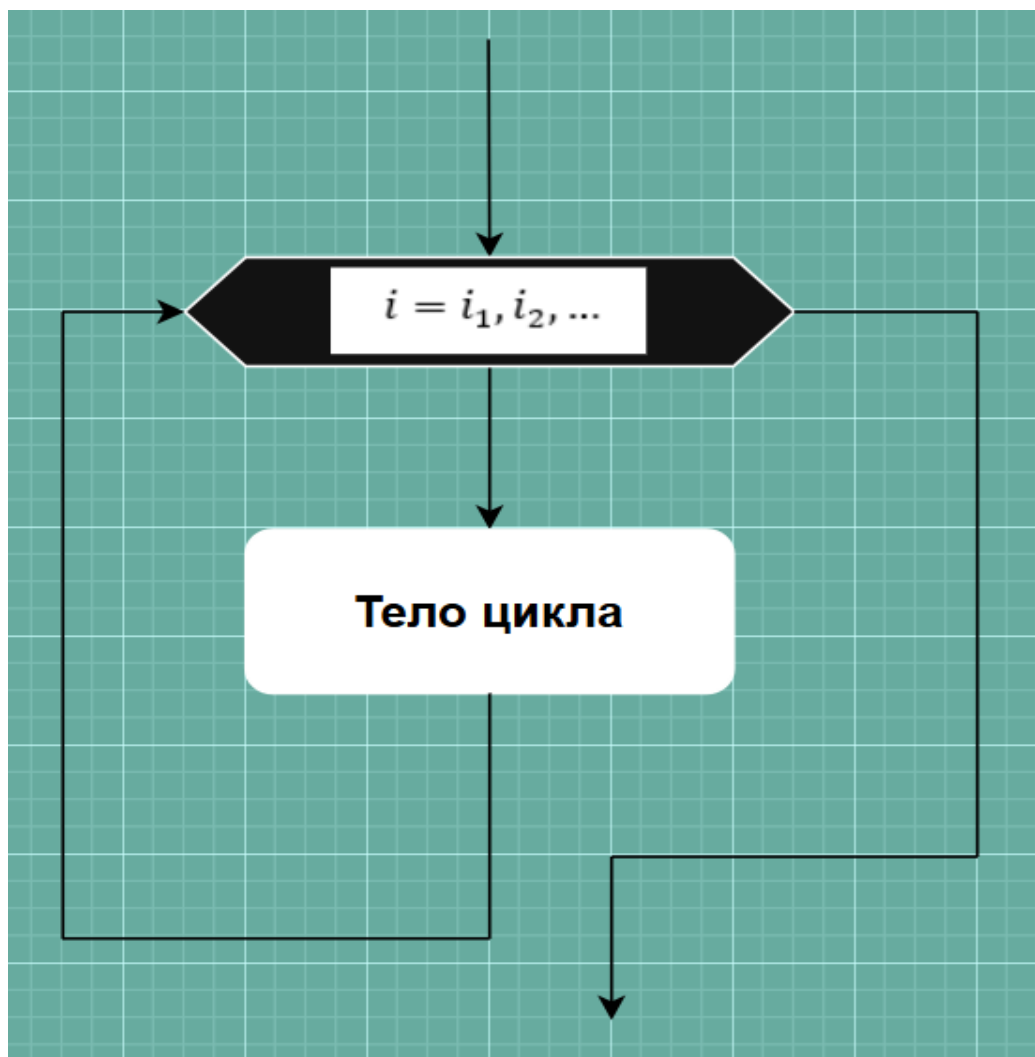


Рисунок 2.8 – Цикл «для»

2.3 Математическое обеспечение бортового тренажерного комплекса

В разработанном математическом обеспечении (Рисунок 2.9) используются 3 метода в определенном алгоритме для адапционно-реабилитационного процесса. Метод Гильберта Хуанга (Рисунок 2.10) и метод ковариации запускаются одновременно, строится эпюра правильного положения центра тяжести космонавта и значение угла отклонения. Если угол отклонения превышает максимальное значение, процесс запускается заново, - существует риск получения травмы стопы. Начинается идентификации углового отклонения центра тяжести методом Прони.

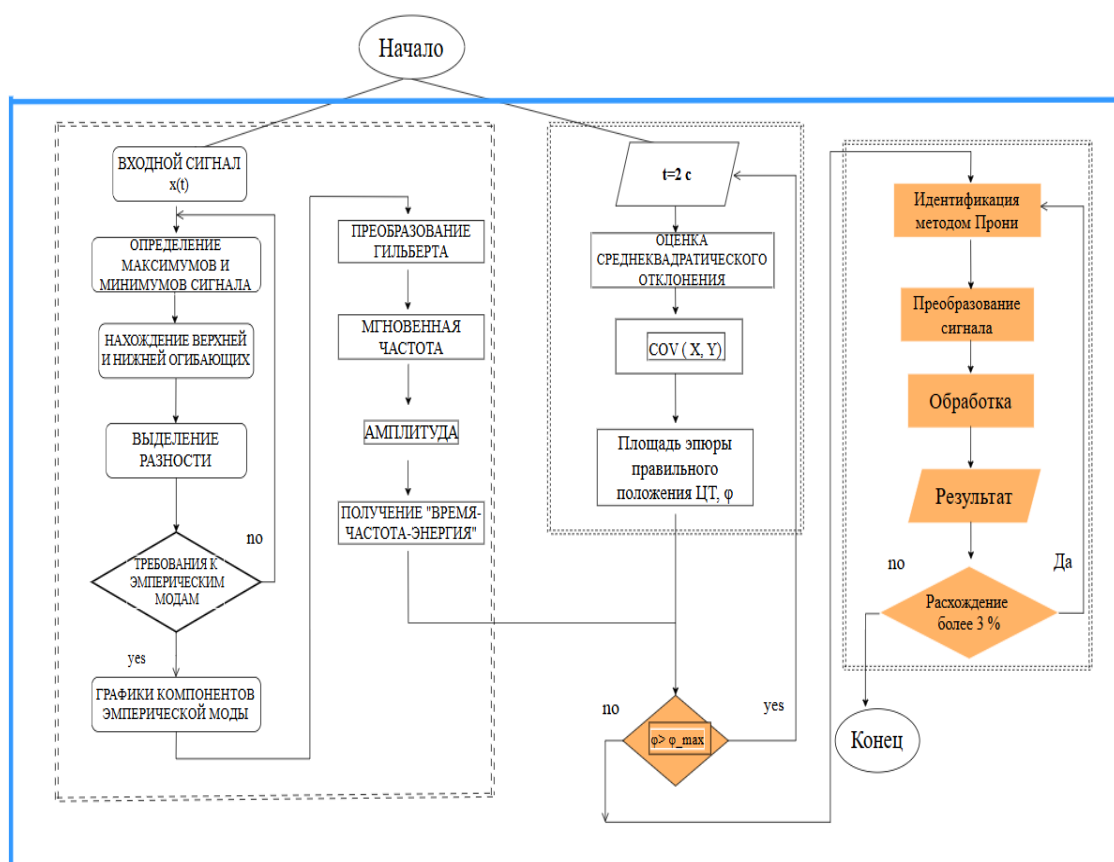


Рисунок 2.9 – Математическое обеспечение технической бортовой системы

Преобразование Гильберта-Хуанга:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.2)$$

Фаза:

$$\theta_i(t) = \arctg \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (2.3)$$

Мгновенная частота:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Амплитуда:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H[c_i(t)]^2} \quad (2.5)$$

Спектр Гильберта:

$$H(\omega, t) = \sum_{j=1}^n A_j(t) e^{i \int_0^t \omega_j(t) dt}, \quad (2.6)$$

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

j - мнимая единица.

Маргинальный спектр:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt, \quad (2.7)$$

где T - длительность сигнала.

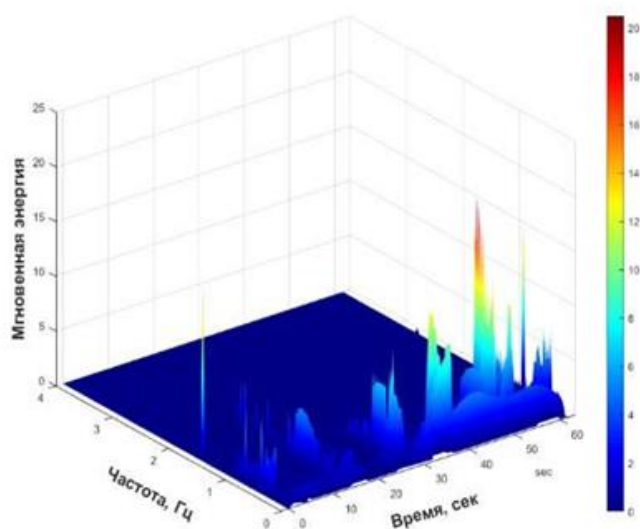


Рисунок 2.10 – Спектр Гильберта «Энергия-частота-время»

Положение центра давления в определенный момент времени t_i обозначается как X_i и Y_i . Программа рассчитывает ряд параметров, используемых для анализа движений (Рисунок 2.12, 2.13). Оценка среднего положения центра давления ($M(X)$, $M(Y)$) представляет среднее значение координат центра давления по фронтальной и сагиттальной плоскостям, соответственно. Данные смещения показывают центр облака точек стабิโลграммы, отражая изменения координат ЦД в процессе обследования после предварительной процедуры центрирования.

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 которых является эпюра правильного положения центра тяжести.

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

Доверительный интервал:

$$(\bar{x} - 3\sigma \leq x \leq \bar{x} + 3\sigma); (\bar{y} - 3\sigma \leq y \leq \bar{y} + 3\sigma), \quad (2.8)$$

$$x = \bar{x} \pm \Delta x; y = \bar{y} \pm \Delta y; P = 0.95, \quad (2.9)$$

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.

$$\sigma_x = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))^2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_y = \sqrt{D(Y)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - M(Y))^2}, \quad (2.11)$$

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

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))(Y_i - M(Y)) \quad (2.12)$$

Площадь рабочей эпюры правильного положения центра тяжести

$$S = 2 \ln \frac{1}{1-\beta} \sqrt{D(X)D(Y) - Cov(X, Y)^2}, \quad (2.13)$$

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 (Рисунок 2.11), после определения которой испытуемый выполняет тест "реакция на движущийся объект" для оценки работоспособности. При вычислении площади эллипса доверительного интервала предполагается, что координаты центра давления подчиняются нормальному закону распределения.

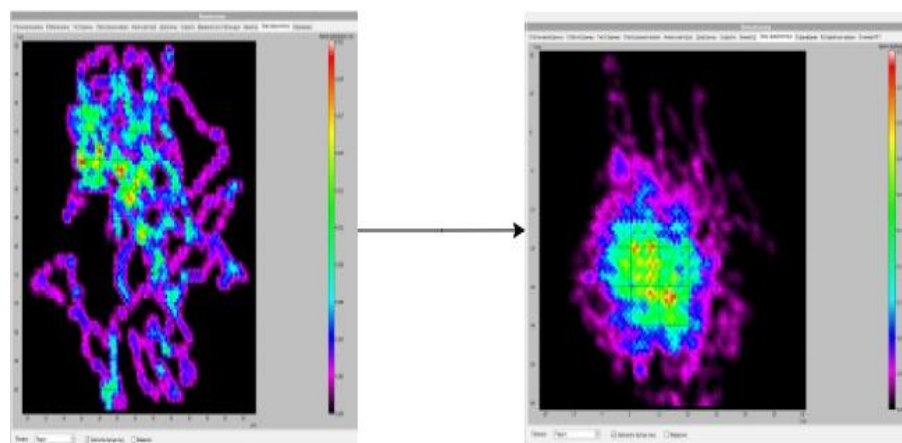


Рисунок 2.11 – Эпюра правильного положения центра тяжести (Результаты статокинезиограммы на лабораторном образце)

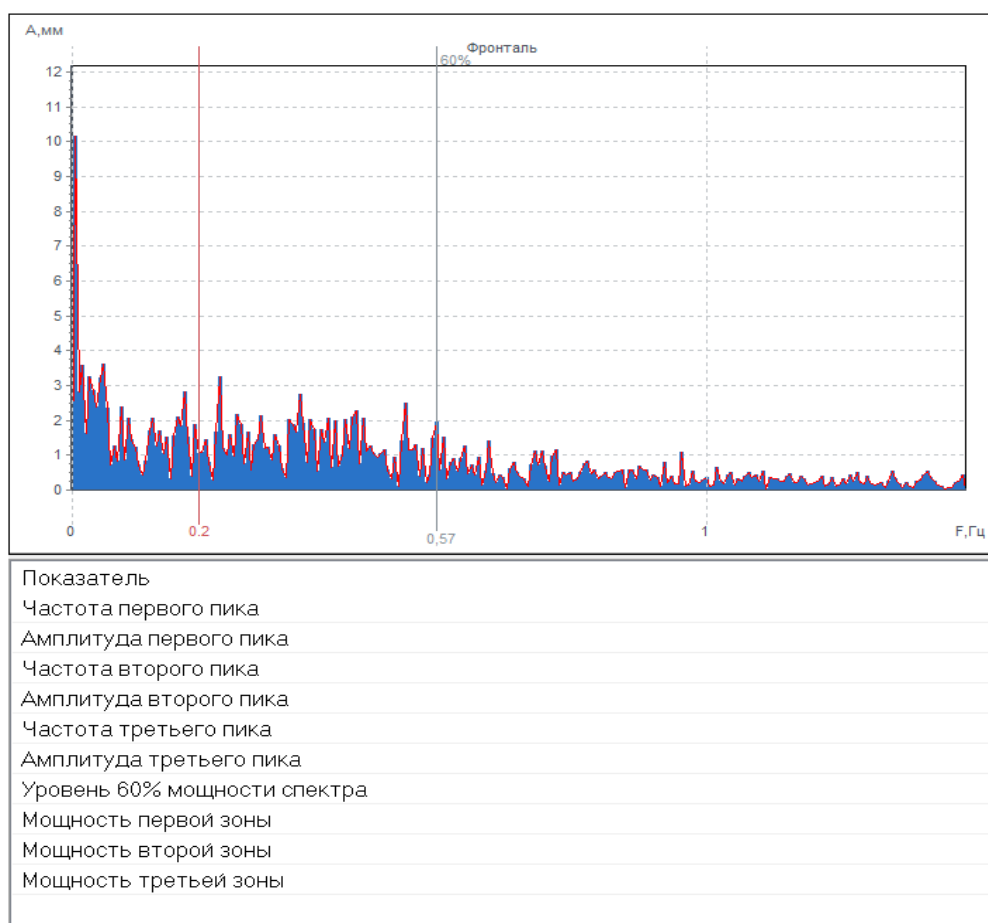


Рисунок 2.12 – Амплитуда колебаний на технической системе по фронтالي

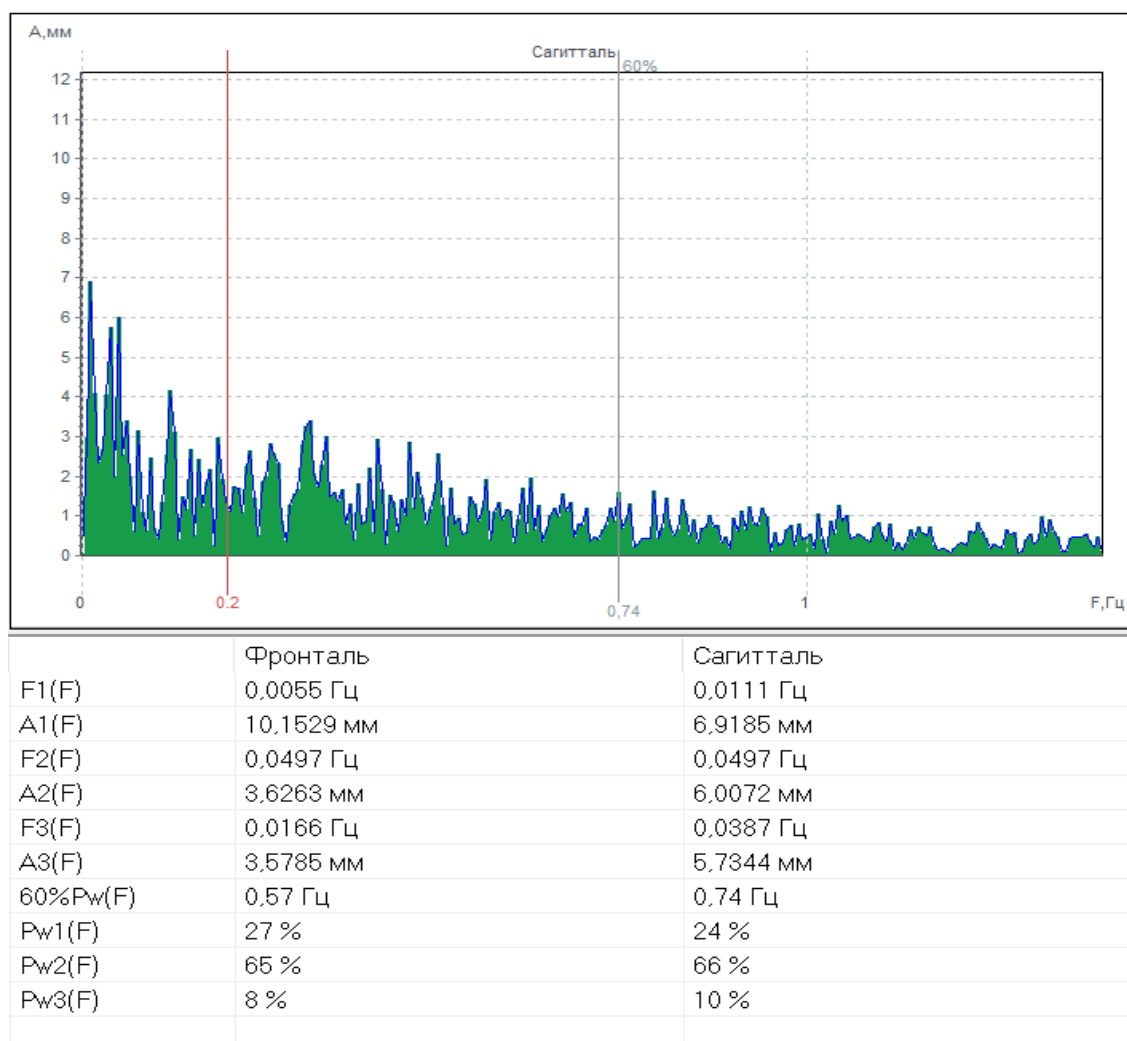


Рисунок 2.13 – Амплитуда колебаний на технической системе по сагиттали

Метод Прони актуален для формирования процедур принятия решений в условиях неопределенности с учетом идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта (Рисунок 2.14).

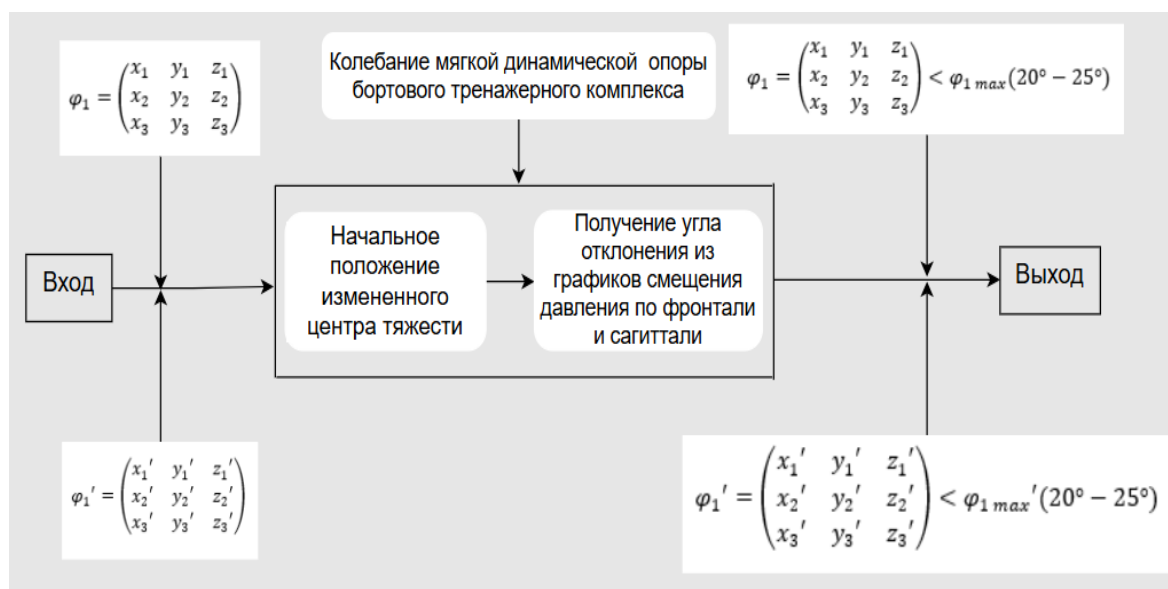


Рисунок 2.14 – Угловое отклонение центра тяжести космонавта

φ_{12} – угол отклонения, измеряемым датчиком, встроенным в опорную систему бортового тренажерного комплекса. Угол формируется из показаний амплитуд и частот, показанных по фронтالي и сагиттали, имеет три координаты, считывающихся с треугольника опоры стопы испытуемого. Величины не превышают максимального значения угла отклонения. Для идентификации математической модели используются показания амплитуд по фронтالي и сагиттали вместе со значением времени, взятом из спектра Гильберта-Хуанга.

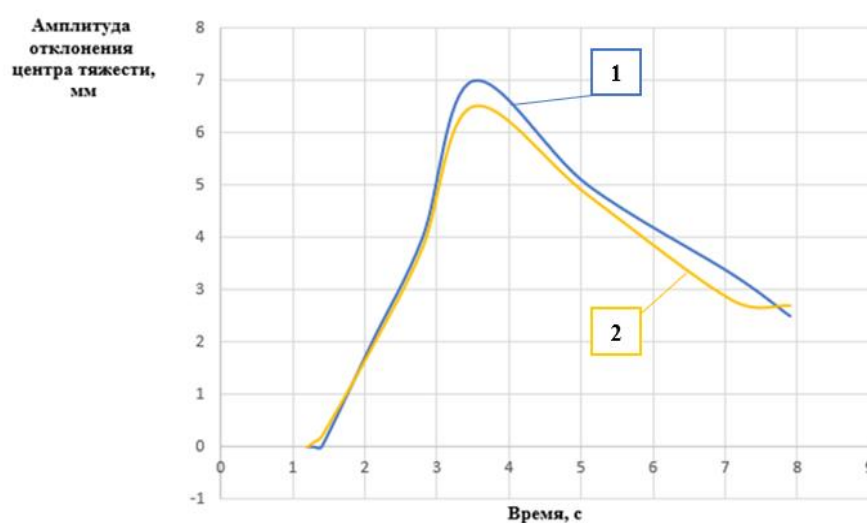


Рисунок 2.15 – Результат идентификации углового отклонения центра тяжести космонавта методом Прони

На Рисунке 2.15 представлены две кривые, где 1- экспериментальная кривая отклонения центра тяжести космонавта; 2- предполагаемое отклонение центра тяжести космонавта.

$$y(t) = Ae^{-\lambda t} \cos(\omega t - \varphi), \quad (2.14)$$

где $y(t)$ мгновенная амплитуда в момент времени t ;

A – начальная амплитуда огибающей, мм;

λ – скорость затухания, мм/с;

φ – фазовый угол, Град;

ω – угловая частота, Гц.

В программном обеспечении предусмотрена возможность применения нескольких аппроксимационных моделей: полная модель колебаний, сумма затухающих синусоид, сумма экспонент, сумма синусоид.

В основу предложенной модификации метода Прони положен способ идентификации математических моделей, описываемых с помощью линейных дифференциальных уравнений конечного порядка.

Расхождение теоретической и экспериментальной кривой не более 3%, что является допустимой погрешностью [42].

Заключение по Главе 2

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

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БОРТОВОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА

3.1 Обратная связь бортового тренажерного комплекса

Для проектирования обитаемой лунной базы разработка бортового тренажерного комплекса (Рисунок 3.1) актуальна, так как без систем реабилитации, являющимися частью системы медико-технического обеспечения, входящую в состав проектирования конструкции летательных аппаратов, программа освоения Луны и межпланетных пилотируемых полетов невозможна [43, 44, 45]. На Рисунке 3.2 представлена блок-схема опорной системы бортового тренажерного комплекса.



Рисунок 3.1 – Динамическая опорная система бортового тренажерного комплекса

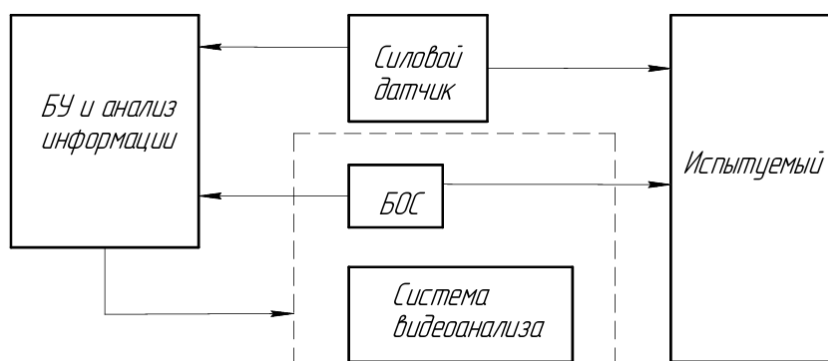


Рисунок 3.2 – Блок-схема опорной системы бортового тренажерного комплекса

Мягкая опора помогает создать новый принцип эффекта памяти стопы (Рисунок 3.3). Известно понятие «треугольника опоры» (Рисунок 3.5).

Правило треугольника опоры стопы гласит, что при оптимальном распределении нагрузки на стопу масса тела распределяется между тремя точками, расположенными в треугольнике стопы.

Стопа выполняет несколько функций, самая значимая – опорная функция. В опорной функции проявляется в способность стопы формировать опору для тела человека, противодействуя вертикальной нагрузке массы тела. Самая сложная функция стопы. Используются способность к балансировке. Угловыми датчиками происходит регистрация отклонения центра тяжести космонавта, силовыми датчиками – регистрация центра давления стоп (Рисунок 3.4). Технические и массогабаритные характеристики бортового тренажерного комплекса приведены в Таблице 3.1.

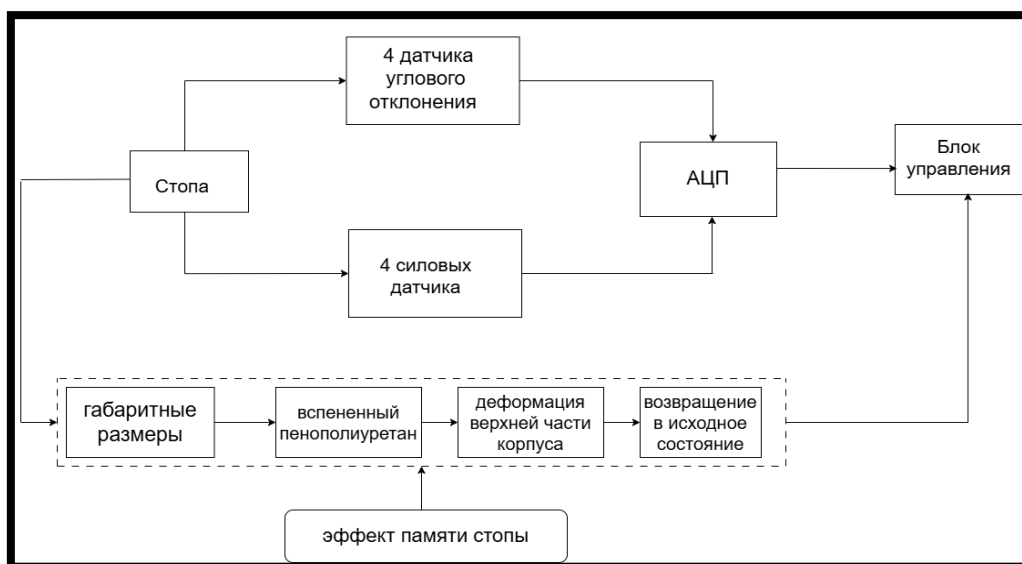


Рисунок 3.3 – Блок-схема опорной системы бортового тренажерного комплекса с эффектом памяти стопы

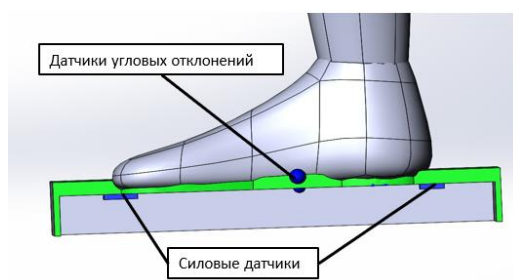


Рисунок 3.4 – Расположение стоп на опорной системе бортового тренажерного комплекса с силовыми датчиками и датчиками угла отклонения стопы

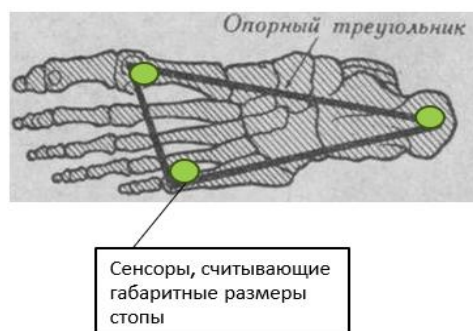


Рисунок 3.5 – Треугольник опоры

Таблица 3.1 – Технические и массогабаритные характеристики 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;

Системы медико-технического обеспечения, использующиеся в реабилитации костно-мышечной системы, обеспечивают контроль за работоспособностью и состоянием ориентации космонавта, правильного положения центра тяжести и биомеханикой движения конечностей при помощи биологической обратной связи и элементов искусственного интеллекта. Проводится с помощью математических методов, случайных факторов, начальных и граничных условий, без которых достижение результата работоспособности на бортовом тренажерном комплексе не реализуемо [46-49].

Ключевые аспекты повышения работоспособности в ходе продолжительных, особенно межпланетных, полетных заданий следует направить на преодоление таких задач:

- достижение наивысшей самостоятельности процедур реабилитации и адаптации;
- подбор подходящих математических подходов и инструментов для анализа состояний;
- совершенствование диагностики через разработку автоматизированной экспертной платформы на основе бесконтактного вычислительного устройства;
- внедрение неинвазивных систем для проведения ключевых диагностических проверок;
- фокус диагностики на измерении уровня нагрузки на системы регуляции;
- разделение уровней работоспособности с использованием компонентов искусственного интеллекта (ИИ) и биологической обратной связи, соответствующих актуальным условиям окружающей среды, от патологий, специфических реакций от неспецифических;
- различение процессов адаптации и реабилитации.

Информация, полученная сенсорами, направляется через анализатор в блок восприятия сигналов, где происходит трансформация и кодирование в нервный импульс. Импульс поступает в блок афферентного синтеза (Рисунок 3.6), формируется цель предстоящей сенсомоторной активности. Приход сигнала в модуль осуществляется двумя способами: из блока восприятия сигналов и через блоки формирования потребностей и мотиваций.

После перехода сигнала от блока восприятия сигналов в блок формирования потребностей, создаются информационные процессы, которые симулируют появление потребностей в процессе функционирования мозга. Значения отклонений переменных от заданных стандартов передаются в блок мотиваций. Взаимодействие элементов блока мотиваций происходит с помощью активации одного элемента (соответствующего определенному сенсорному сигналу)

подавляет возбуждение остальных, с которыми сигнал связан. Один из элементов блока мотиваций становится преобладающим.

Преобладающий элемент создает сигнал с растущей амплитудой, который направляется в блок афферентного синтеза. Информационный процесс, моделирующий возможные варианты будущих двигательных действий и последствий, осуществляется в блоке принятия решений. В блоке происходит выбор оптимального пути для достижения результата, то есть выбор двигательного действия, соответствующего заданному сенсорному сигналу. Модель предстоящего действия сохраняется в элементах памяти блока акцептора результатов действия.

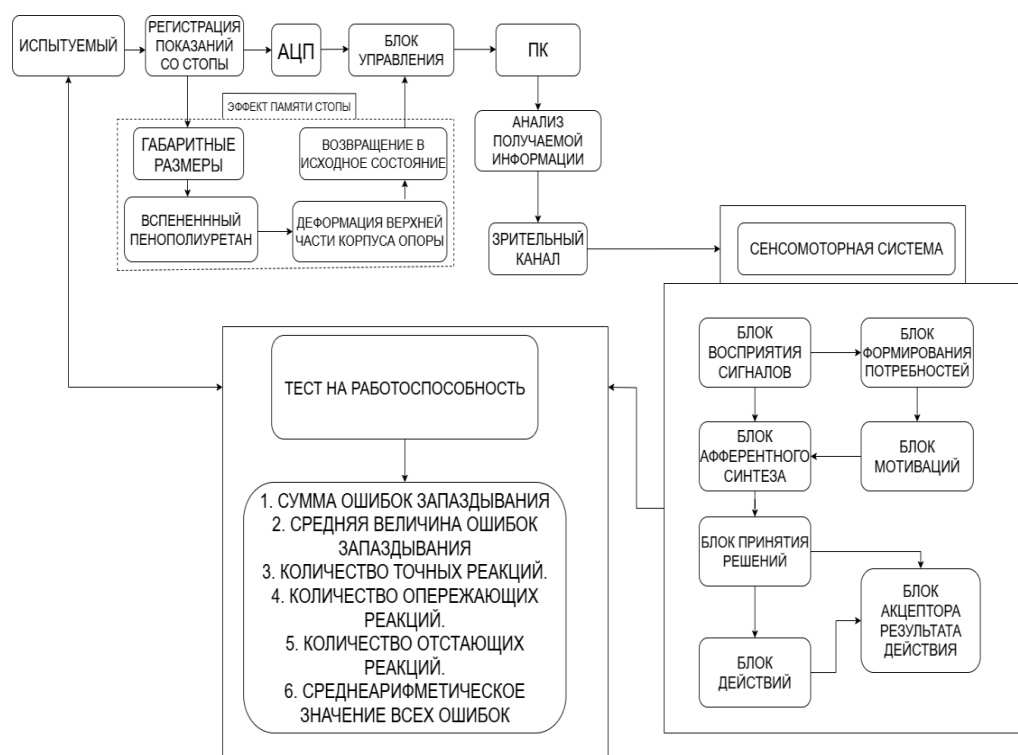


Рисунок 3.6 – Узел биологической обратной связи, позволяющий проводить экспериментальное исследование на бортовом тренажерном комплексе без вмешательств оператора

После выполнения двигательных действий информация о параметрах передается из блока действий в блок акцептора результатов действия, где на короткое время фиксируется след их возбуждения. В результате происходит оценка соответствия выполненного действия заданному сенсорному сигналу [50].

3.2 Качество работы сенсомоторной системы космонавта

Понятие качество работы как части всеобъемлющего управления качеством может определяться понятием «Качество 5-ти М» в соответствии с «ISO – 45001». Диаграмма «Качество 5-ти М» позволяет проанализировать первопричины снижения качества. Доказано, что не обязательно сразу ставить 5 вопросов, обеспечивающих «Качество 5-ти М». На Рисунке 3.7 рассмотрены и приведены показатели качества (Качество 5-ти «М»), характеризующие работу сенсомоторной системы космонавта на бортовом тренажерном комплексе.

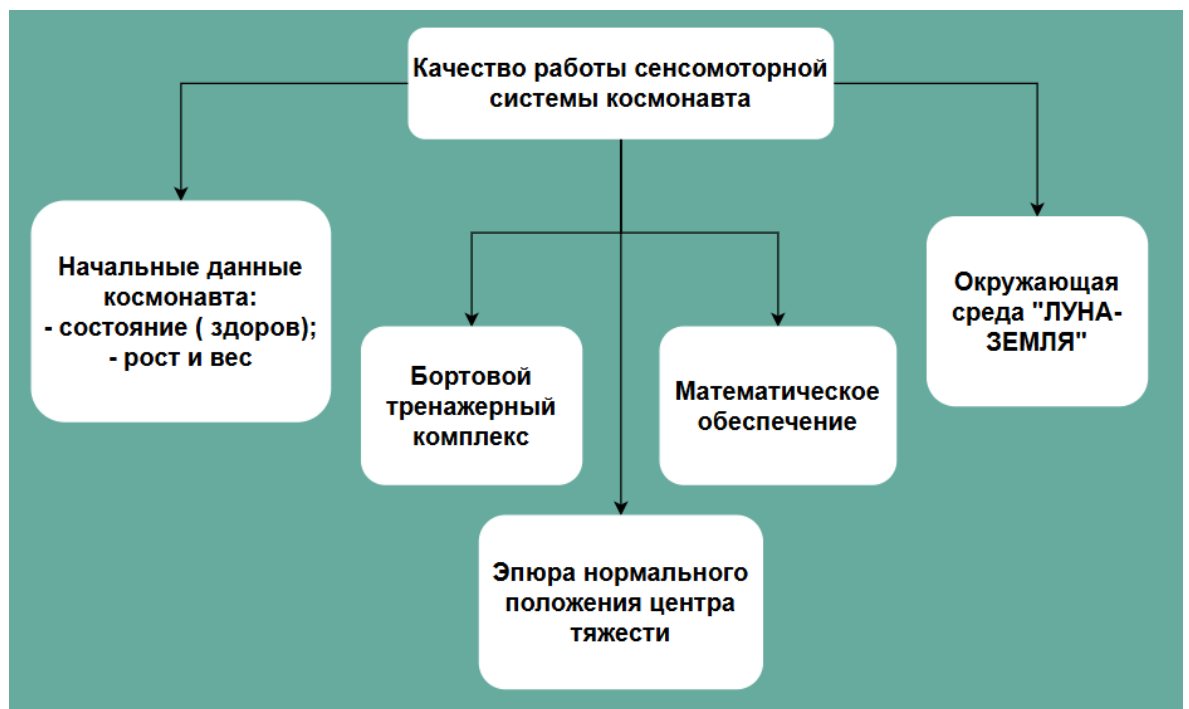


Рисунок 3.7 – Показатели качества работы сенсомоторной системы космонавта

Можно начать с первого - космонавт - чтобы получить один ответ. Космонавт имеет не один, а множество ответов, из которых нужно выбрать основной. В рассматриваемом случае вначале поставлено множество вопросов для проблемы. Анализ показал, что первопричина – ухудшение работоспособности космонавта, связанная с изменением положения тела в пространстве в условиях обитаемой лунной базы. «Качество 5-ти М» - гибкий инструмент определения качества.

Большое влияние на качество выполнения целевых задач (ссылка на рисунок), таких как точность регламентных работ, замена агрегатов в любой бортовой аппаратуре, оказывает управление телом космонавта в неисследованной среде луны.

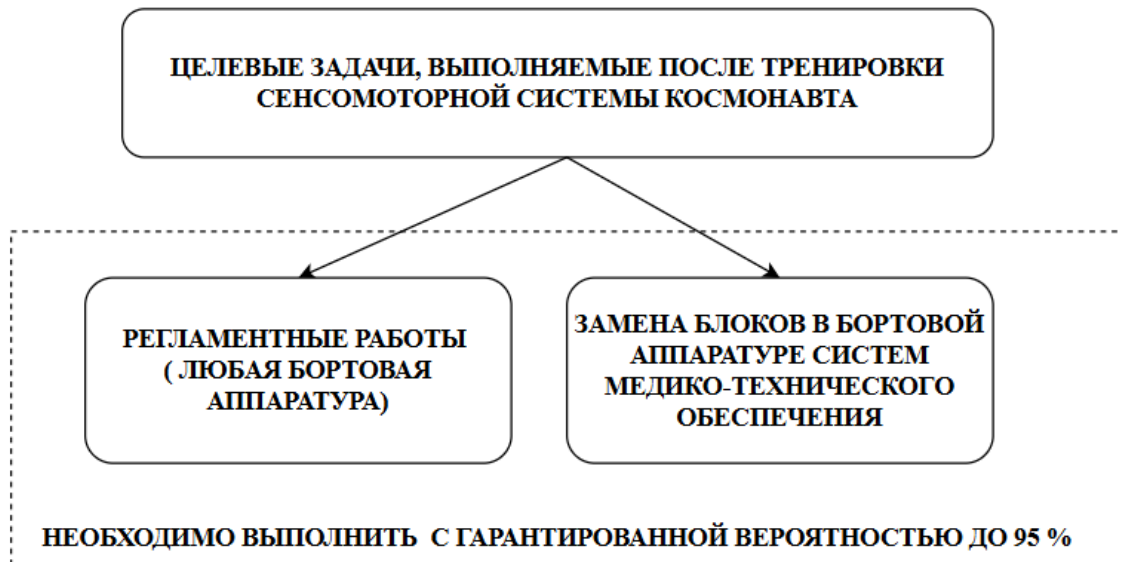


Рисунок 3.8 – Целевые задачи

Методика экспериментального функционального исследования на бортовом тренажерном комплексе состоит из нескольких этапов (Рисунок 3.9). К эксперименту допускаются 9 испытуемых, каждый из которых проходит тренировку на технической бортовой системе, после чего допускается к проведению теста, состоящего из 9 опытов, на работоспособность. Цель эксперимента – выявить оптимальный результат работоспособности для выполнения полетных программ.



Рисунок 3.9 – Методика эксперимента на первом лабораторном образце

После тренировки сенсомоторной системы космонавта наблюдается повышение эффективности регламентных работ за счет исключения ошибок испытуемого, последствия которых катастрофичны при выполнении технологических работ на обитаемой лунной базе.

3.3 Специализированное прикладное программное обеспечение

Специализированное программное обеспечение персонального компьютера (Рисунок 3.10) разработано для решения специализированных задач в области

реабилитационно-адаптационного процесса. Программа имеет наиболее удобный интерфейс для синхронизации и передачи данных.



Рисунок 3.10 – Специализированное программное обеспечение

Заключение по Главе 3

Для создания комплекса реабилитационно-адаптационных мероприятий в условиях лунной гравитации получены следующие результаты:

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

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

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

ГЛАВА 4 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ТРУД-ОТДЫХ»

4.1 Этапы и структура системы «ТРУД-ОТДЫХ»

На основе работоспособности космонавта в норме и при нарушении показателей работоспособности автоматизированная система позволит выполнить анализ полученных результатов. Многокритериальность задач моделирования бортового тренажерного комплекса требует непосредственного участия инженеров-проектировщиков, интерфейс программного комплекса организован для пользователей различного рода деятельности и уровня подготовки. На каждом шаге выполнения задачи в системе присутствует информационная поддержка, помогающая в принятии различных решений. Целесообразно организовать поддержку в виде справок, видео и текстовых подсказок. В настоящий период не существует реализаций аналогичных автоматизированных систем, создание является актуальной задачей, решение которой имеет большое теоретическое и практическое значение в пилотируемой космонавтике [51, 52, 53, 54].

Для создания новых конструкций пилотируемых объектов и обеспечения работоспособности космонавтов необходимо усовершенствовать бортовой тренажерный комплекс. Выполнив программы полета к другим планетам, предотвратить чрезвычайные ситуации на борту космических аппаратов. Параметры работоспособности космонавта необходимы для создания и адаптации алгоритмов функционирования технической адаптационно-реабилитационной системы (Рисунок 4.1).

В соответствии с ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования» режим труда и отдыха (РТО) космонавта обеспечивает профессиональную надежность космонавта при сохранении высокой работоспособности на всем протяжении полета согласно пункту 7.3.3.2. За организацию РТО в полете отвечает

руководитель полета. Контроль за выполнением РТО во время полета осуществляет заместитель руководителя полета.

Представлены этапы при построении системы «ТРУД-ОТДЫХ», основанной на вероятностно-статистических методах для поддержания работоспособности:

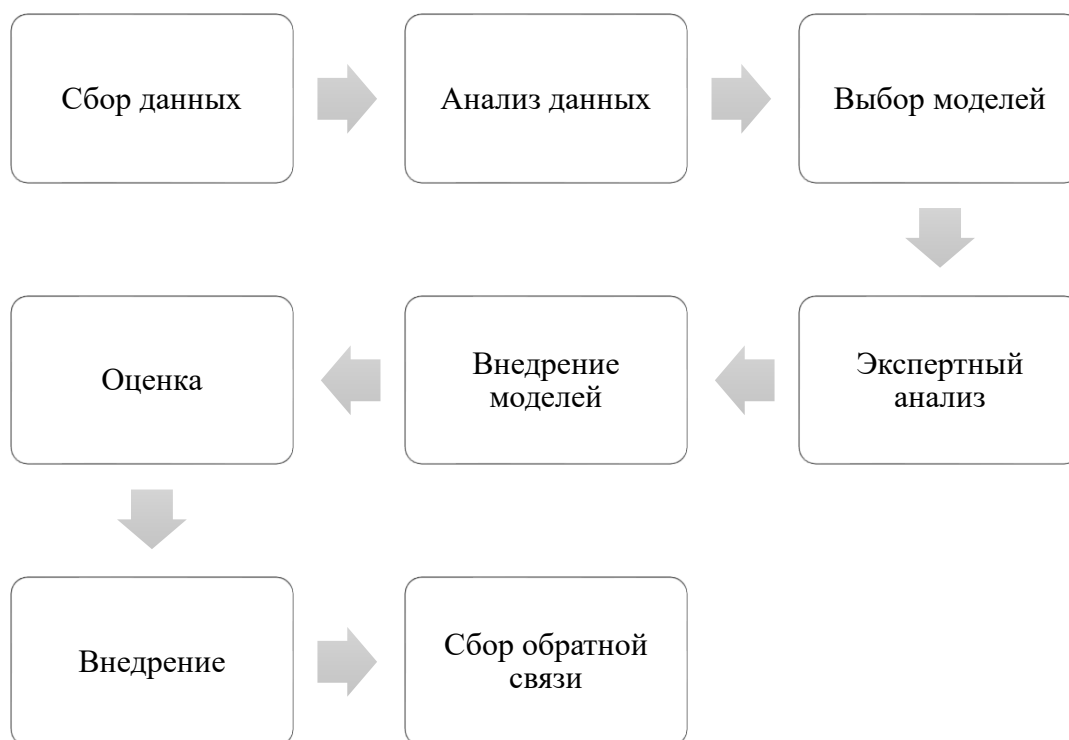


Рисунок 4.1 – Этапы при построении системы «ТРУД-ОТДЫХ», основанной на вероятностно-статистических методах

- на основании сбора и анализа данных система «ТРУД-ОТДЫХ» бортового тренажерного комплекса обеспечит профессиональную деятельность в целях сохранения работоспособности лунной экспедиции в экстремальных условиях и обитаемой лунной базы;
- с помощью выбора математической модели данная система способна прогнозировать управление центром тяжести космонавта и уровень работоспособности экипажа в условиях измененной гравитации, после чего проводится экспертный анализ;
- система способна заключить вероятностно-статистический выводы о работоспособности экипажа на основе байесовской классификации, что позволит

внедрить в медико-технический контроль для решения о коррекции РТО с последующим сбором обратной связи с центром управления полетами (ЦУПом).

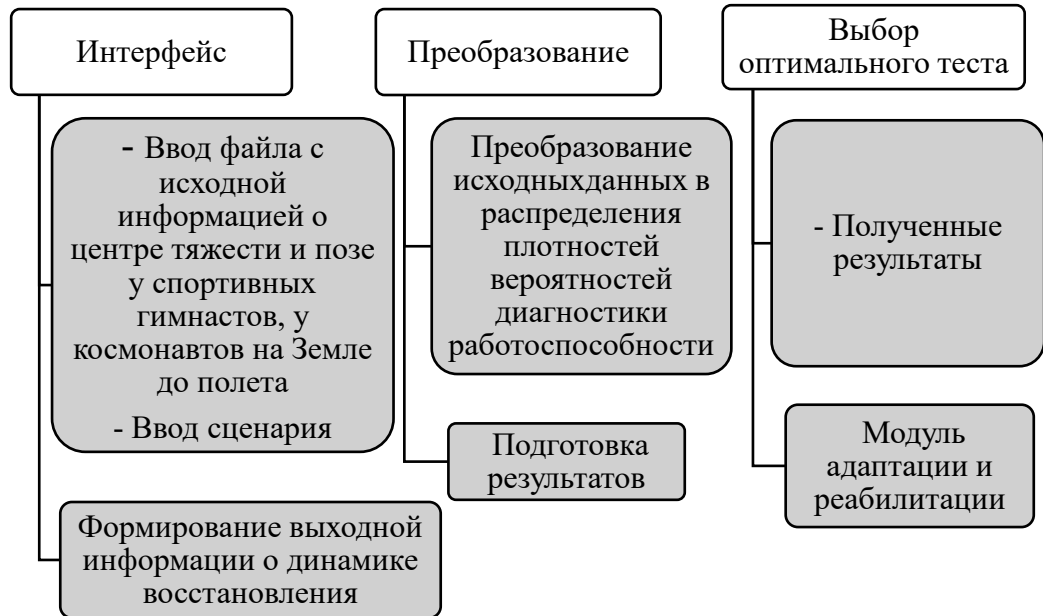


Рисунок 4.2 – Структура системы «ТРУД-ОТДЫХ»

Структура системы «ТРУД-ОТДЫХ» (Рисунок 4.2) позволяет производить беспроводную регистрацию сигналов о координатах космонавта в объеме корабля. Лунная станция оборудуется беспроводной сенсорной сетью, поддерживающей и передающей сигнал требуемых параметров движения на компьютер с использованием биологической обратной связи. Получаемая информация позволит более оперативно и точно принимать решения о коррекции режима труда и отдыха, мероприятиях реабилитационно-адаптационного сопровождения и психологической поддержки экипажа. Успешная реализация разработанной системы мониторинга позволит включить систему управления деятельностью и работоспособностью космонавта в медико-технический контроль и систему поддержки принятия решений по медико-техническому обеспечению экипажей космических аппаратов. Предлагаемая система «ТРУД-ОТДЫХ» может успешно

использоваться в пилотируемой космонавтике, земных исследованиях и в спортивной деятельности.

Используется набор данных в массиве, сравниваемых у спортивных гимнастов, перемещение центра тяжести и поза которых во время профессиональных упражнений приблизительно к изменению позы космонавтов во время лунной экспедиции.

Методы *Data Mining* – способы классификации, моделирования и прогнозирования данных, при помощи которых проводится аналитическая работа по выявлению закономерностей в больших массивах информации. Интеллектуальный анализ позволяет структурировать данные, опираясь на количественные и качественные показатели. При работе с большими объемами информации часто применяются:

- кластерный анализ (иерархический и неиерархический подходы);
- байесовские сети вероятностей;
- обнаружение явных и скрытых связей между данными;
- линейная регрессия для прогнозирования;
- визуальное представление информации;
- эволюционные алгоритмы оптимизации;
- генетические алгоритмы поиска.

В зависимости от подхода к обработке данных, методы *Data Mining* делятся на два основных типа:

1) Методы, основанные на непосредственном использовании и сохранении исходных данных. В процессе анализа данные детализируются для создания прогнозной модели или выявления аномалий. Эти методы часто неэффективны при работе со значительными объемами информации. К категории относятся кластерный анализ, метод ближайшего соседа, метод *k*-ближайших соседей и рассуждения на основе аналогий.

2) Дистилляция шаблонов – процесс выявления и применения структурированных паттернов, извлечение полезной информации из исходных данных и преобразование в упорядоченную и систематизированную форму. В

группу входят логические, визуальные методы, кросс-табуляционные анализы и методы, основанные на уравнениях.

Использование представленных методов позволяет эффективно использовать информацию, полученную в результате неструктурированного поиска, - более компактна по сравнению с базами данных, - трансформируя в доступные для восприятия пользователями закономерности [55, 56, 57, 58, 59, 60].

Методы логического анализа подразделяются на категории, включающие формулировку приблизительных запросов, применение символьных правил, деревьев решений и генетических алгоритмов. Технологии перекрестной табуляции основываются на использовании так называемых агентов, байесовских сетей и визуальных перекрестных таблиц. Статистические методы и нейронные сети объединяются в методы, базирующиеся на уравнениях.

Существует альтернативная классификация методов *Data Mining* – в соответствии с принципами применения математических моделей в процессе обучения. Выделяют две группы:

1) Статистические методы, которые применяют обобщенный опыт, полученный из данных, накопленных в базах данных за продолжительный период времени. При использовании статистических методов осуществляется предварительный анализ природы статистической информации, выявляются взаимосвязи и закономерности, проводится многомерный статистический анализ, разрабатываются динамические модели и формируются прогнозы на основе временных рядов;

2) Кибернетические методы, которые используют принципы вычислительной математики и технологий искусственного интеллекта. К числу методов относятся: эволюционное программирование, нейронные сети, системы обработки экспертных знаний.

Среди кибернетических методов выделяют правила ассоциаций, схемы принятия решений, нечеткую математику и генетические алгоритмы.

Диагностика работоспособности имеет большую выборку данных, которые используются в байесовской сети (Рисунок 4.3).

Байесовские сети представляют собой действенный и наглядный инструмент для отображения знаний, связанных с неоднозначностью. Байесовская сеть (БС) – графическая модель, демонстрирующая вероятностные взаимосвязи множества переменных и позволяющая осуществлять вероятностные выводы, опираясь на переменные.

Структура БС включает два ключевых компонента:

- 1) Графическое представление, устанавливающее комплект зависимостей и независимостей в совокупности случайных величин, репрезентирующих объекты исследуемой области;
- 2) Систему вероятностных распределений, определяющих интенсивность зависимостей, заложенных в графической структуре.

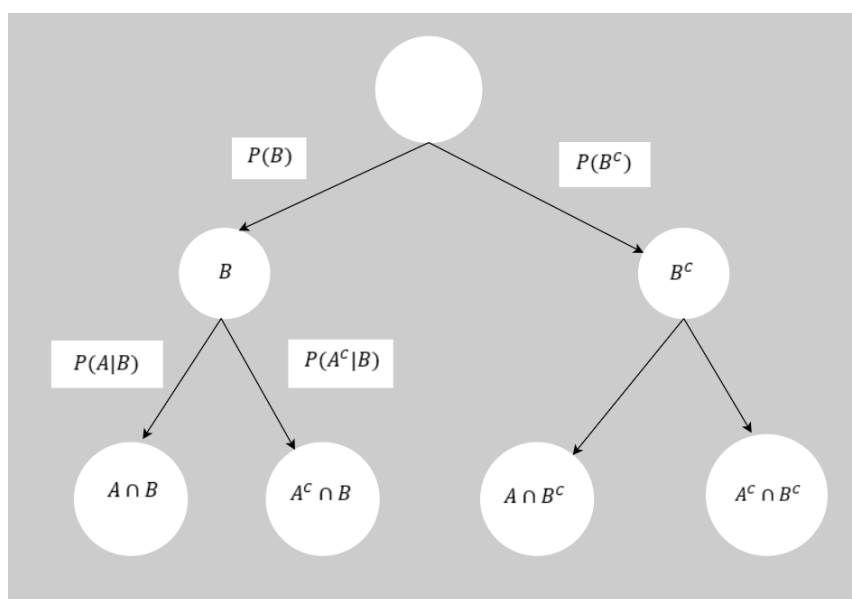


Рисунок 4.3 – Графическая модель Байеса

При решении задач диагностики работоспособности экипажа учитываются как зависимость между ошибками первого и второго рода, и диагностическими признаками с учетом достоверностей проверок, так и поступление новой информации [61, 62, 63, 64, 65, 66].

Ключевая функция байесовских сетей состоит в вычислении апостериорных вероятностей отдельных переменных при наличии данных наблюдений в сети. В зависимости от того, какие узлы подлежат наблюдению, выделяют:

- Прогнозирование (прямой вывод) — определение вероятности события при наблюдаемых причинах;
- Диагностирование (обратный вывод, абдукция) — определение вероятности причины при наблюдаемых следствиях;
- Межпричинный вывод (смешанный вывод, трандукция) — определение вероятности одной из причин наступившего события при условии наступления одной или нескольких других причин события.

Для решения диагностических задач широко используются подходы и математические инструменты искусственного интеллекта, такие как нейросети, продукционные и нечеткие логические модели, байесовские сети. Для эффективной работы нейронных сетей необходимы большие объемы размеченных статистических данных, мощное и дорогостоящее аппаратное обеспечение. Выбор структуры нейронной сети представляет собой сложную задачу, не имеющую четких правил.

В настоящее время байесовские сети доверия (БСД) активно развиваются в области представления и моделирования знаний. Вероятностные графические модели позволяют интегрировать начальные знания об объекте с новыми данными (экспериментальными, статистическими) для получения апостериорной оценки. Байесовские сети – один из ведущих методов машинного обучения. При диагностировании БСД позволяют учитывать взаимосвязь между ошибками первого и второго рода, диагностическими признаками и степенями доверия к проверкам, поступление новой информации (результаты проверок диагностических признаков, данные об отказах элементов космического аппарата).

$$P_A * H_i = \frac{P(H_i) * P_{Hi}(A)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) * P_{Hi}(A)}, \quad (4.1)$$

где $P(H_i)$ – вероятности до опытных гипотез, другими словами, априорные вероятности; $P_{Hi}(A)$ – условные вероятности при выборе i -й гипотезы возникновения события A ; $P_A * H_i$ – условная вероятность i -й гипотезы после возникновения события A , иными словами, апостериорная вероятность.

Благодаря теореме Байеса становится возможным изменение значения вероятности, основанного на более поздних полученных сведениях о перемещении центра тяжести и позе космонавта.

4.2 Определение тестов

При математическом анализе данных используются часто применяемые в статистике такие параметры, как чувствительность и специфичность (Таблица 4.1). Аналогами являются ошибки первого и второго рода.

Таблица 4.1 – Определение тестов

Тест	Нарушение работоспособности	
	Есть	Нет
Положительный	Истинно положительный (<i>a</i>)	Ложно положительный (<i>b</i>)
Отрицательный	Ложно отрицательный (<i>c</i>)	Истинно отрицательный (<i>d</i>)

Формулы для вычисления чувствительности (Se) и специфичности (Sp):

$$Se = \frac{a}{a + c} \quad (4.2)$$

$$Sp = \frac{d}{b + d} \quad (4.3)$$

Определив специфичность, предполагаем, какова доля здоровых лиц, у которых исследование даст отрицательный результат. Чем выше специфичность метода, тем надежнее подтверждается заболевание, и тем, следовательно, более эффективен. Высокоспецифичные методы называются в диагностике дискриминаторами. Исследование эффективно на втором этапе диагностики, когда круг предполагаемых нарушений работоспособности сужен и необходимо с большой уверенностью доказать наличие дефекта. Отрицательным фактором высокоспецифичного метода диагностики является факт, что использование сопровождается значительным числом пропусков неисправного состояния работоспособности экипажа. В диагностике состояния экипажа оптимален метод исследования, который априорно как высоко специфичен, так и высоко чувствителен.

На практике повышение чувствительности теста неизбежно сопровождается потерей специфичности и наоборот - повышение специфичности сопряжено со снижением чувствительности. Методики диагностики работоспособности с высокой чувствительностью редко «пропускают» космонавтов, у которых имеется дефект. Чтобы создать оптимальную диагностическую систему, нужно найти компромисс между показателями чувствительности и специфичности, при которых финансовые затраты на обследование оптимально отражают баланс между рисками «ложных тревог» и пропуска дефекта.

Широкое применение нашел ROC-анализ, использующий операционные характеристики приемника (*Receiver Operating Characteristic curves*), для установления пороговых значений, разграничивающих нормальное состояние от патологического. Метод демонстрирует взаимосвязь между долей правильно идентифицированных положительных случаев и долей ложно

классифицированных отрицательных случаев. Можно сопоставить результативность различных исследовательских подходов и оценить, насколько эффективно разные диагностические системы определяют патологические изменения у космонавтов.

1 шаг. Построение *ROC*-кривых, которые отражают зависимость между долей истинно положительных и ложноотрицательных результатов. Если *ROC*-кривая располагается вдоль диагонали, указывает на бесполезность теста. Нахождение *ROC*-кривой ниже диагонали с правой стороны свидетельствует об абсурдности теста. Положение *ROC*-кривой выше диагонали слева говорит о полезности.

При визуализации чувствительности и специфичности на графике (Рисунок 4.4), наилучшим считается тест, который демонстрирует такое соотношение показателей, при котором площадь прямоугольника, сформированного перпендикулярами, опущенными из точки на кривой к осям координат, достигает максимума [67, 68, 69, 70, 71].

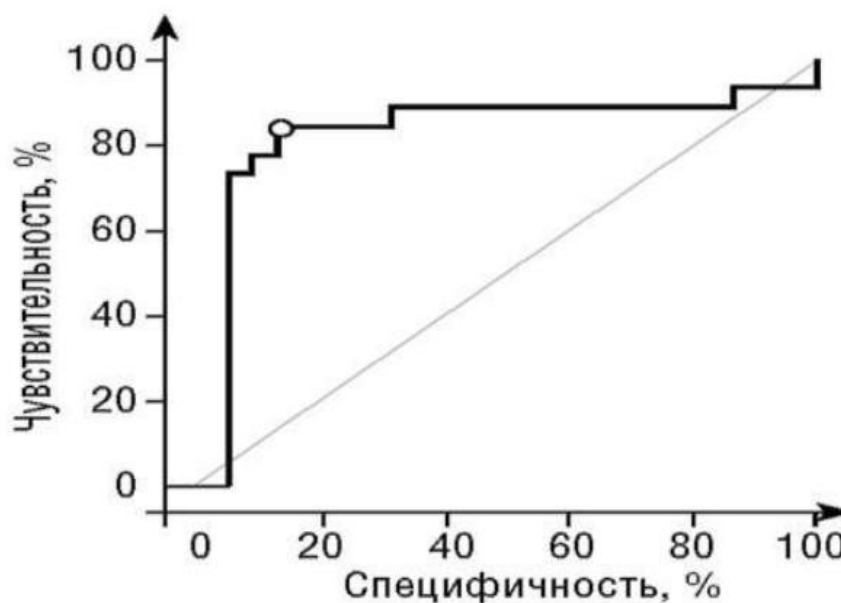


Рисунок 4.4 – Отображение показателей чувствительности и специфичности

2 шаг. Выявление диагностической чувствительности, специфичности, точности и оптимального порога разделения (Рисунок 4.5) между нормой и патологией.

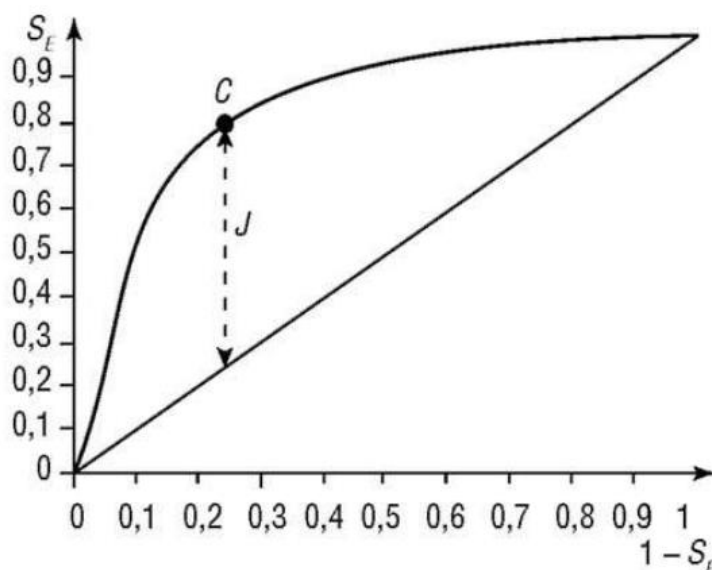


Рисунок 4.5 – Диагностическая точка разделения

Оптимальный порог разделения – значение параметра теста, при котором достигаются наивысшие значения чувствительности и специфичности. Результаты тестирования, попадающие в "нормальный" диапазон, классифицируются как "истинно отрицательные", а результаты, указывающие на "патологию" – как "истинно положительные".

3 шаг. Для количественной оценки клинической значимости теста и сопоставления нескольких тестов применяется показатель AUC (площадь под ROC -кривой), вычисляемый на основе метода трапеций.

4 шаг. Сопоставление результативности диагностических тестов. У «совершенного» теста кривая устремляется к верхнему левому углу графика, где доля истинно положительных случаев равна 100%. Соответственно, чем сильнее кривая отклоняется вниз, тем ниже качество теста (Рисунок 4.6).

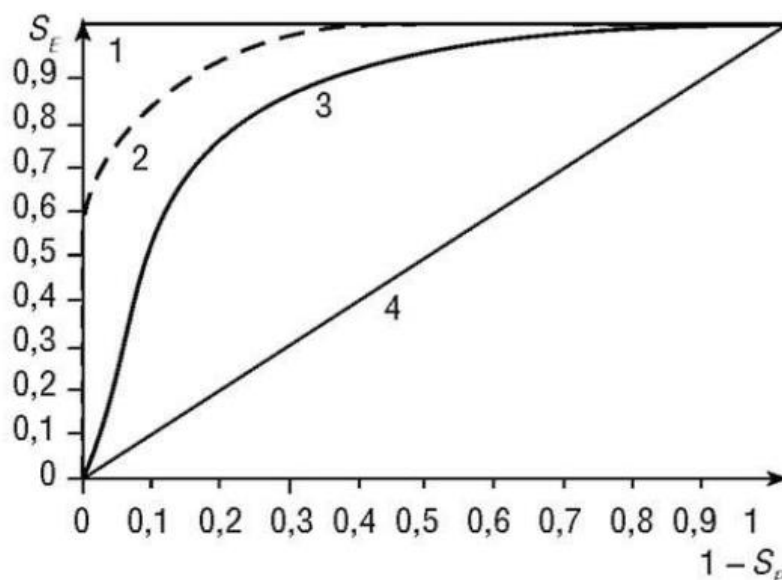


Рисунок 4.6 – Выбор оптимального теста

4.3 Изучение реакции на движущийся объект

Методика разработана для исследования комплексной пространственно-временной реакции человека на стимул (объект), перемещающийся с заданной скоростью по заранее определенной траектории. Ключевым фактором, определяющим точность реакции на движущийся объект (РДО), является оценка момента достижения объектом определенного пространственного положения (оценка временного интервала).

Время РДО зависит от баланса процессов возбуждения и торможения, протекающих в коре головного мозга и отвечающих за восприятие времени. Проявляется в противоположных типах ошибок реакции: запаздывающих и опережающих (Таблица 4.2). Методика РДО позволяет выявить некоторые типологические черты высшей нервной деятельности и темперамента человека. Вместе с тем, изменения в функциональном состоянии центральной нервной системы (ЦНС), обусловленные усталостью или воздействием негативных факторов, оказывают влияние на паттерн ответных действий [72, 73, 74, 75, 76].

Чтобы проверить точность восприятия движущихся объектов испытуемому на дисплее монитора было представлено изображение фигуры с белой и чёрной точками, где чёрная точка перемещалась по контуру фигуры по часовой стрелке с установленной скоростью [77, 78, 79, 80, 81]:

Наблюдая за траекторией чёрной точки, испытуемый в предполагаемый момент совпадения с белой точкой нажимал кнопку «*STOP*», прерывая движение чёрной точки вдоль фигуры (Рисунок 4.7). Система рассчитывала абсолютную величину расхождения между позициями чёрной и белой точек (отклонение), а по истечении определённого интервала возобновляла перемещение по контуру.

Таблица 4.2 – 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

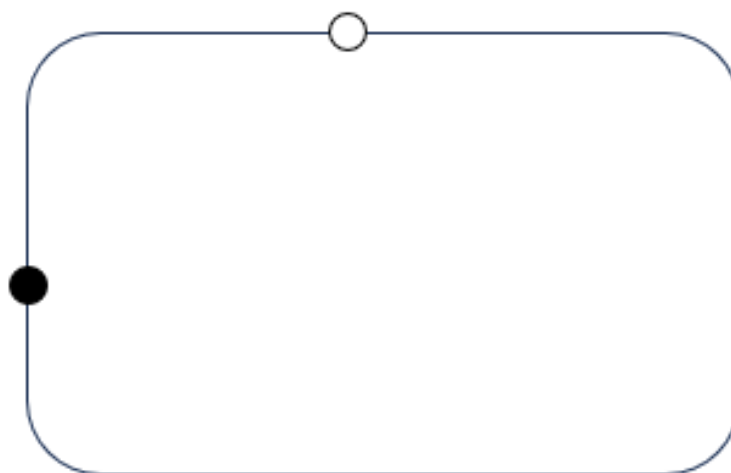


Рисунок 4.7 – Тест «реакция на движущийся объект»

$$T_p = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}, \quad (4.4)$$

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 оценивается точность двигательных действий испытуемого.

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 4.8).

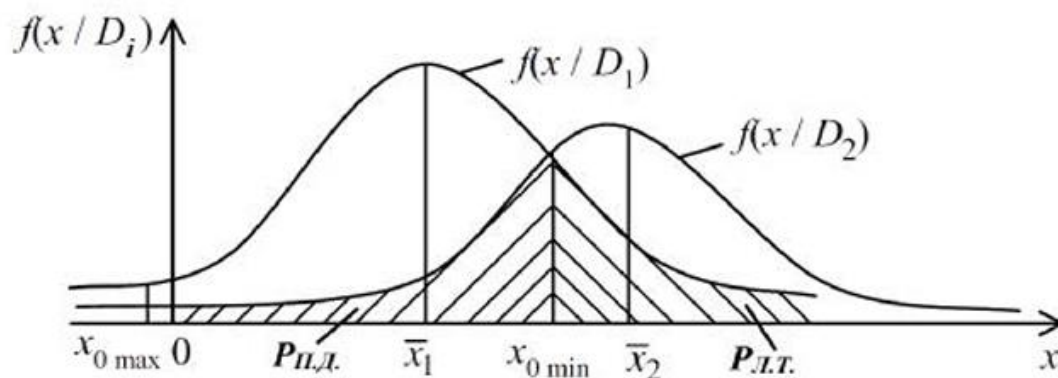


Рисунок 4.8 – Распределение плотности вероятностей диагностического параметра x для работоспособного состояния D_1 и не работоспособного D_2 состояний

$x_{0\max}$, $x_{0\min}$ – соответствуют экстремальным значениям усреднённого риска ошибочных заключений;

$P_{п.д.}$, $P_{л.т.}$ – 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 такого значения x_0 , которое бы полностью исключило ошибочные решения. Задача состоит в определении оптимального значения x_0 минимизирующего количество неверных заключений. Возможные ошибки при принятии решений включают в себя ложное срабатывание (ошибка первого типа), когда объект в исправном состоянии ошибочно классифицируется как неисправный (дефектным) (вместо D_1 принимается D_2), и пропуск дефекта (ошибка второго типа), когда дефектный объект ошибочно признается исправным (вместо D_2 принимается D_1). Обозначим 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.

Вероятность ложной тревоги эквивалентна вероятности одновременного наступления двух событий: наличия объекта в исправном состоянии и превышения значением x порогового значения x_0 для состояния:

$$P(H_{21}) = P(D_1) * P(x > x_0 / D_1) = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x_0 / D_1) dx = P_1 [1 - F(x_0 / D_1)], \quad (4.5)$$

где $P_1 = P(D_1)$ – вероятность получения неудовлетворительной отметки D_1 до проверки (принимается как данное на основании предшествующей статистики);

$F(x_0 / D_1) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_1) dx$ – на промежутке определяющаяся функция распределения;

Схожим образом устанавливается вероятность необнаружения дефекта, зависящая от факта существования дефектного состояния и того, что значение x для состояния меньше порогового x_0 :

$$P(H_{12}) = P(D_2) * P(x < x_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_2) dx = P_2 [F(x_0 / D_2)], \quad (4.6)$$

где $P_2 = P(D_2)$ – априорная вероятность получения неудовлетворительной оценки D_2 (полагается установленной на базе собранной статистики заранее);

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

Неправильное решение складывается из возможности ошибочного срабатывания и вероятности невыявления дефекта. Если назначить цену каждому виду ошибки (C_{21} – цена ложного срабатывания, а C_{12} – цена невыявленного дефекта), то получится конечное общее уравнение для расчета усредненного риска [82, 83, 84, 85, 86]:

$$R = C_{21} P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x_0 / D_1) dx + C_{12} P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x_0 / D_2) dx = C_{21} P_1 [1 - F(x_0 / D_1)] + C_{12} P_2 F(x_0 / D_1) \quad (4.7)$$

Результаты уменьшения количества ошибок в каждом опыте у испытуемых представлены в Таблице 4.3., обработка которых проводилась регрессионным анализом. График уменьшения ошибок у испытуемых (X8, X9) отражен на Рисунке 4.9.

Таблица 4.3 – 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

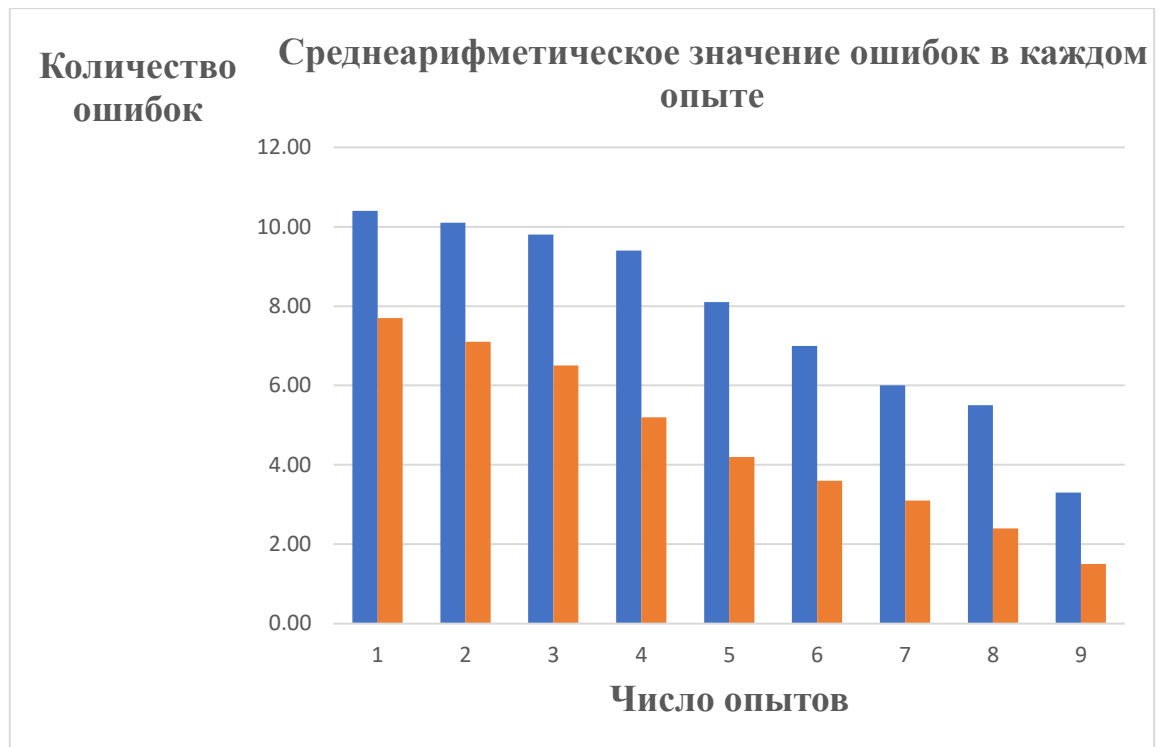


Рисунок 4.9 – Среднеарифметическое значение ошибок у испытуемых (X8, X9) в каждом опыте

Заключение по Главе 4

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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, 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

Система биологической обратной связи интегрирована с компонентами искусственного интеллекта. В настоящем исследовании представлено теоретическое обоснование возможности введения искусственного интеллекта в программно-аппаратный комплекс для тренировок. Для корректной работы искусственного интеллекта необходим первичный набор данных, формируемый с использованием запатентованного прибора. Роль искусственного интеллекта заключается в анализе траектории центра тяжести, выполняемом как зрительным анализатором. Результаты исследований академика Козловской свидетельствуют о том, что оптимальная эффективность тренировок достигается при исключении зрительного анализатора из контура обратной связи. В земных условиях проблема решается с помощью ассистента, проводящего эксперимент, что станет невозможным в условиях лунной базы. Для эффективной оценки функционального состояния необходимо определить ключевые характеристики. На основе характеристик формируются рекомендации для космонавта с использованием интеллектуальной системы. Для цели предложена экспертная система оценки, функционирующая на основе комбинированного подхода к построению алгоритма.

На этапе предварительного анализа проводится изучение особенностей входной информации, включая наличие и значимость категориальных переменных, пропущенные значения, соотношение количества переменных и наблюдений. На основе полученной информации лицо, принимающее решение (ЛПР), определяет настройки следующего модуля – предварительный анализ данных. Модуль предоставляет возможность восстановления пропущенных данных с использованием различных методов и исключения выбросов. Модуль многомерного статистического анализа, обрабатывающий числовые и нечисловые данные, позволяет выделить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на результат состояния работоспособности [87, 88, 89, 90, 91].

Использование модуля значительно уменьшает количество анализируемых переменных и снижает требования к объему выборки, необходимому для создания нейронной сети. Рекомендуется применять дискриминантный анализ с итеративным включением переменных в качестве метода многомерной обработки данных. На этапе выявления значимых факторов принимается решение о наборе переменных, которые будут использованы для построения нейронной сети диагностики отклонений. Эксперт может дополнить перечень, основываясь на результатах работы предыдущего модуля. Далее следует этап построения нейронной сети для классификации, используя заданный набор входных переменных и диагноз. Опыт решения подобных задач демонстрирует целесообразность использования двухслойных нейронных сетей прямого распространения с сигмоидальной функцией активации. В завершающем блоке принятия решения оценивается достижение поставленной цели – создание нейросети для формирования отчета нарушений работоспособности с заданной точностью [92, 93, 94, 95, 96].

В случае недостижения поставленной цели происходит переход к управляющей подсистеме, которая организует передачу управленческого решения в подсистему сбора и обработки информации, а затем – в блок выбора данных для анализа. После итерационная комбинированная процедура построения диагностической модели повторяется [97, 98, 99, 100, 101].

Применение нейронных сетей обусловлено тем, что корректная классификация космонавтов, сохраняющих работоспособность, возможна только путем сравнения с остальными космонавтами.

Сформулированы следующие заключения:

- 1) Система «ТРУД-ОТДЫХ» в условиях неопределенности актуальна и необходима для прогнозирования параметров работоспособности лунной экспедиции.
- 2) На основании начальных данных, взятых у спортивных гимнастов, заложенных в массив, можно сделать вывод о динамике восстановления работоспособности экипажа на бортовом тренажерном комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строгонова Л.Б., Столярчук В.А., Макарова С.М., Васин Ю.А. Лунная база, проблемы обитаемости // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – № 67. – С.1–10.
2. Строгонова Л.Б., Макарова С.М., Столярчук В.А. Обучение специалистов высшей квалификации при решении проблем освоения космического пространства для оценки степени риска человека при межпланетных миссиях // Тезисы доклада 61-й Международной астронавтической конференции (61 MAF / IAC-10-E1). – Прага, 2010. — С. 3–11.
3. Johnston R.S., Hull W.E. Apollo missions. In: Johnston R.S., Dietlein L.F., Berry Ch.A., eds. Biomedical results of Apollo. Washington, D.C.: NASA. – 1975. – P. 9–40.
4. Dietlein L.F. Summary and conclusions. In: Johnston R.S., Dietlein L.F., Berry Ch.A., eds. Biomedical results of Apollo. Washington, D.C.: NASA. – 1975: – P. 573–579.
5. Григорьев А.И., Потапов А.Н., Джонс Дж.А., Салливан Т.А., Шойринг Р.А. Медицинское обеспечение межпланетных полетов. В кн.: Пестов И.Д., Соуин Ч.Ф., Чаус Н.Г., Хансон С.И., ред. Космическая биология и медицина. Российско-американское сотрудничество в области космической биологии и медицины. М.: Наука; 2009. – С. 627–736.
6. Котов А.Н., Захаров С.Ю., Руденко Е.А., Баранов В.М. Влияние многосуточной антиортостатической и ортостатической гипокинезии на ортостойчивость человека // Медицина экстремальных ситуаций. – 2016. – С 25–29.
7. Панченков Д.Н., Баранов М.В., Астахов Д.А., Нечунаев А.А., Леонов С.Д., Бехтева М.Е. Биохимические аспекты влияния антиортостатической гипокинезии на течение экспериментального перитонита // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. – 2013. – С. 56–60.

8. Баранов М.В., Катунцев В.П., Шпаков А.В., Баранов В.М. Метод наземного моделирования физиологических эффектов пребывания человека в условиях гипогравитации // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2015. – С. 392–396.

9. Баранов В.М., Катунцев В.П., Баранов М.В., Шпаков А.В., Тарасенков Г.Г.. Вызовы космической медицине при освоении человеком Луны: риски, адаптация, здоровье, работоспособность // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2018. – № 3. – С. 109–122.

10. Цыганков О.С. Концепция трудовой деятельности в гипогравитационном пространстве Луны // Воздушно-космическая сфера. – 2020. – №4 (105). – С. 42–51.

11. Цыганков О.С. Луна в ракурсе человеческого фактора // Полет. Общероссийский научно-технический журнал». – 2007. – № 11. – С. 16–23.

12. Корягина Ю.В., Абуталимова С.М., Абуталимов А.Ш., Нопин С.В. Технологии медицинской реабилитации опорно-двигательного аппарата и нервной системы космонавтов в санаторно-курортных условиях // Современные вопросы биомедицины. – 2023. – Т.7(2). – С. 248–256.

13. Усачев В.И., Морозова С.В., Скедина М.А. Современные алгоритмы стабилметрической диагностики постуральных нарушений в клинической практике // Медицинский совет. – 2017. – № 8. – С. 116–122.

14. Usachev V.I., Dotsenko V.I., Kononov A.F., Artemov V.G. New methodology for the stabilometric diagnosis of equilibrium dysfunction, 2009. – P. 19–22.

15. Доценко В.И. Математические методы диагностики постуральных нарушений в клинической практике // Медицинский совет. – 2019. – № 6. – С. 115–121.

16. Усачев В.И. Оценка динамической стабилизации центра давления стоп по данным анализа векторов статокинезиграммы. В кн.: П.-М. Гаже, Б. Вебер Постурология. Регуляция и нарушения функции равновесия тела человека: перевод с французского. Под ред. В.И. Усачева. СПб: Издательский дом СПбМАПО, 2008. – С. 291–296.

17. Usachev V.I. Estimation of dynamic stabilization of vertical body position in diagnostics of effectiveness of treatment and rehabilitation. Abstracts of the 5TH International Posture Symposium. Bratislava, 2008. – 53p.

18. Усачев В.И., Доценко В.И., Кононов А.Ф., Артемов В.Г. Новая методология стабилметрической диагностики нарушения функции равновесия тела // Вестник оториноларингологии. – 2009. – № 3. – С. 19–22.

19. Усачёв В.И., Артёмов В.Г., Кононов А.Ф. Способ оценки функционального состояния человека (ИДС): патент на изобретение № 2380035. — М., 2010. — Приоритет от 26.01.2009.

20. Григорьев А.И., Бугров С.А., Богомолов В.В. и др. Обзор основных медицинских результатов годового полета на станции «Мир» // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1990. – № 5. – С. 3–10.

21. Гуровский Н.Н., Егоров А.Д. Изменения основных функций организма в космических полетах // Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6»-«Союз». М.: Наука, 1986. – С. 19 – 23.

22. Егоров А.Д., Ицеховский О.Г., Алферова И.В. и др. Исследования сердечно-сосудистой системы // Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6»-«Союз». М.: Наука, 1986. – С. 89 – 114.

23. Оганов В.С., Новиков В.Е., Бакулин А.В. и др. Динамика состояния костной системы российских космонавтов - участников экспедиций на МКС // Международная космическая станция. Российский сегмент. Т. 1. М., 2011. – С. 149 –158.

24. Tavassoli M. Anemia of spaceflight // Journal of the American Society of Hematology. – 1982. – № 5. – P. 1059 – 1067.

25. Williams D., Kuipers A., Mukai C., Thirsk R. Acclimation during space flight effects on human physiology // Canadian Medical Association Journal. –2009. – Vol. 180. – P. 1317 – 1323.

26. Баранов М.В., Захаров С.Ю., Новикова О.Н., Руденко Е.А. Программа медицинского обследования космонавтов, завершивших летную деятельность // Медицина экстремальных ситуаций. – 2016. – № 1(55). – С. 19 – 24.
27. Скворцов, Д.В. Стабилометрическое исследование: краткое руководство / Д.В. Скворцов. – М.: Маска, 2010. – 176 с.
28. Huang, N.E. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences. – 1971. – Vol. 454. – P. 903-995.
29. Дакинова М. В., Бикчентаева Л. М., Саченков О. А., Балтина Т. В., Яфаров Г. Г. // Спектральный анализ стабิโลграфических сигналов методами Фурье и Гильберта -Хуанга. –2022 г. – № 4. – С. 15 – 30.
30. Ш.Ч. Кан, А.В. Микулович, В.И. Микулович. Анализ нестационарных сигналов на основе преобразования Гильберта – Хуанга // ИНФОРМАТИКА. – 2010. – № 2. – С. 25 – 35.
31. 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.
32. 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.
33. Angelaki DE, McHenry MQ, Dickman JD, Newlands SD, Hess BJ. Computation of inertial motion: neural strategies to resolve ambiguous otolith information. J Neurosci. –1999. – № (1). – P. 316 – 327.
34. Antonutto G, Capelli C, Girardis M, Zamparo P, di Prampero PE // Effects of microgravity on maximal power of lower limbs during very short efforts in humans. J Appl Physiol. – 1999. – № 86(1). – P. 85 – 92.

35. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Егоров А.Д. и др. Пилотируемая экспедиция на Марс. Под редакцией Коротеева А.С. – М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.

36. Томиловская Е.С., Козловская И.Б., Кукоба Т.Б., Рукавишников И.В., Амирова Л.Е. Влияние гравитационной разгрузки на тонус мышц спины // Физиология человека. – 2017. – № 3. – С. 64 – 73.

37. Орлов О.И., Черногоров Р.В., Переведенцев О.В., Поляков А.В. Использование технологий компьютерного ассистирования для оптимизации средств оказания медицинской помощи применительно к пилотируемым межпланетным космическим полетам // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2018. – № (2). – С. 10–15.

38. Леванов В.М., Переведенцев О.В., Орлов О.И., Черногоров Р.В. Внекорабельная деятельность на поверхности Луны в условиях длительных экспедиций: предварительная оценка дополнительных рисков для здоровья и роль телемедицинских систем в их минимизации // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2019. – № 2. – С. 5-12.

39. Утемесов Р.М., Шимко Е.А. Лабораторный измерительный вычислительный комплекс для стабилметрических исследований // Известия Алтайского государственного университета. – 2021 г. – № 4. – С. 66–70.

40. Суздальцев В. А., Тахавова Э. Г., Шлеймович М. П. Представление знаний в информационных системах. Математическое моделирование. — Казань: Изд-во Казанского гос. технического ун-та им. Туполева А.Н., 2005. — 98 с.

41. Алексеев В. В. Теория алгоритмов : Издательство СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2021. — 100 с.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

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

48. Евдокименков В.Н. Компьютерные технологии сбора, обработки и анализа данных медико-биологических исследований Федер. агентство по образованию, Моск. авиац. ин-т (гос. техн. ун-т). - Москва : Изд-во МАИ, 2005 (Тип. изд-ва МАИ). - 435 с.

49. Лобанов В.В. Модели и методы синтеза и реализации специализированных гибридных экспертных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Лобанов В.В.; Саратовский государственный технический университет. — Саратов, 2006. — 20 с.

50. Строгонова Л.Б. Структура системы поддержки принятия решений при восстановлении активной работоспособности экипажа в условиях изменённой гравитации на обитаемой лунной // Тезисы докладов 23-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». — Москва: Издательство «Перо», 2024. — С. 178–179.

51. Курочкин А.В. Модель, методы и алгоритмы информационно - аналитических экспертных систем учёта и анализа данных медицинских обследований: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации / А. В. Курочкин; Белорусский государственный университет. — Минск, 2022. — 22 с.

52. Антонова Н.Е. Применение гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений в стабилотрии // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2014. — № 3. — С. 235–243.

53. Дорожко И.В. Модель системы поддержки принятия решений для диагностирования бортовых систем космического аппарата на основе байесовских сетей / И. В. Дорожко, О.А. Иванов // Труды МАИ. — 2021. — № 117. — С. 1–27.

54. Россиев Д.А. Определение информативности медицинских параметров с помощью нейронной сети // Диагностика, информатика и метрология-94: тезисы научно-технической конференции. — Санкт-Петербург, 1994. — С. 348.

55. Антонова Н.Е. Алгоритмы обработки стабилотрических сигналов для поддержки принятия решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Антонова Н.Е.; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. — Саратов, 2014. — 16 с.

56. Наumenко А.П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: теория, примеры, задачи: учебное пособие / Наumenко А.П. — Омск: Издательство ОмГТУ, 2018. — 108 с.

57. Лобанов В.В. Модели и методы синтеза и реализации специализированных гибридных экспертных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Лобанов В.В.; Саратовский государственный технический университет. — Саратов, 2006. — 20 с.

58. Котов Ю.Б. Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики / Котов Ю.Б. — 2-е изд. — Москва: УРСС, 2011. — 328 с.

59. Газарян В.А., Иваницкая Н.В., Пытьев Ю.П., Шаховская А.К. О задаче компьютерной диагностики заболеваний желудочно-кишечного тракта // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. — 2003. — № 2. — С. 12–15.

60. Газарян В.А., Нагорный Ю.М., Пытьев Ю.П., Шаховская А.К. О теоретико-возможностных методах решения задач медицинской диагностики // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. — 2008. — Т. 12, № 1–4. — С. 65–82.
61. Пытьев Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение / Пытьев Ю.П. — Москва : Физматлит, 2007. — 464 с.
62. Dempster A.P. The Dempster–Shafer calculus for statisticians // International Journal of Approximate Reasoning. — 2008. — Vol. 48, № 2. — P. 365–377.
63. Dubois D., Prade H. Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. — 2001. — Vol. 32. — P. 35–66.
64. Журавлёв Ю.И. Об алгоритмах распознавания с представительными наборами (о логических алгоритмах) // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2002. — Т. 42, № 9. — С. 1425–1435.
65. Doria A.S. Optimizing the role of imaging in appendicitis // Pediatric Radiology. — 2009. — Vol. 39, N 2. — P. 144–148.
66. Williams R.F. Appendiceal perforation in children: a 10-year experience // Journal of the American College of Surgery. — 2009. — Vol. 208, N 5. — P. 819–824.
67. Пытьев Ю.П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы и приложения. — Москва : Физматлит, 2014. — 380 с.
68. Газарян В.А. О теоретико-возможностной симптоматике заболеваний // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. — 2005. — № 4. — С. 3–6.
69. Газарян В.А. Теоретико-возможностная модель компьютерной диагностики // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. — 2006. — № 6. — С. 15–18.

70. Газарян В.А. О теоретико-возможностных методах анализа эффективности лечения // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. — 2010. — Т. 14, № 1–4. — С. 107–122.
71. Газарян В.А. Эмпирическое восстановление математических моделей медицинской диагностики : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.13.18 / Газарян Варвара Арамовна; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. - Москва, 2013. - 150 с.
72. Kirnos E.A., Pyt'ev Yu.P., Djukova E.V. Training the «Kora» Type Algorithms // Pattern Recognition and Image Analyses. — 2002. — V. 12, N 1. — P. 19–24.
73. Журавлёв Ю.И. Об алгоритмах распознавания с представительными наборами (о логических алгоритмах) // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2002. — Т. 42, № 9. — С. 1425–1435.
74. Doria A.S. Optimizing the role of imaging in appendicitis // *Pediatr Radiol*. — 2009. — Vol. 39. N 2. — P. 144–148.
75. Williams R.F., Blakely M.L., Fischer P.E. et al. Diagnosing ruptured appendicitis preoperatively in pediatric patients // *J Am Coll Surg*. — 2009. — Vol. 208. N 5. — P. 819–825.
76. Воронцов К.В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики. — М.: Физматлит, 2004. Т. 13. — С. 5–36.
77. Белицкая Е.Я. Учебное пособие по медицинской статистике. — Л: Медицина, Ленинградское отделение, 1972. — 175 с. — С. 13–29
78. Догле Н.В., Юркевич А.Я. Заболеваемость с временной утратой трудоспособности. — М.: Медицина, — 1984. - 176 с.
79. Журавлева К.И. Статистика в здравоохранении / К. И. Журавлева. - М: Медицина, 1981. - 176 с.
80. Колядо В.Б. Медицинская статистика : методическое пособие. — Барнаул, 1998. — 151 с.

81. Лисицын Ю.П. Общественное здоровье и здравоохранение. М.: «ГЭОТАР-медиа», 2007. – 512с.
82. Медик В.А., Токмачев М.С. Руководство по статистике здоровья и здравоохранения. – М.:ОАО «Издательство «Медицина», 2006. – 528с.
83. Мерков А.М., Поляков Л.Е. Санитарная статистика. – Л.: Медицина. Ленингр. отд-ние, 1974. - 383 с.
84. Миняев В.А., Юрьев В.К. Общественное здоровье и здравоохранение. – М.: ИКЦ Академкнига, 2008. – 233 с.
85. Поляков И.В., Соколова Н.С. Практическое пособие по медицинской статистике. – Л.: Медицина. Ленингр. отд-ние, 1975. - 151 с.
86. Кучеренко В.З. Применение методов статистического анализа для изучения общественного здоровья и здравоохранения: учеб. пособие для вузов. – М.: ГЭОТАР – Медиа, 2006. – 192 с.
87. Botyaev V.L., Zagrevskiy O.I. Psikhomotornye sposobnosti sportsmenov k zritel'no-prostranstvennoy orientatsii i ikh vzaimosvyaz' so zritel'no-prostranstvennym vospriyatiem // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2009. – № 5 (332). — P. 182-185.
88. Zakamskiy A.V., Polevshchikov M.M., Rozhentsov V.V. Otsenka tochnosti dvigatel'nykh deystviy sportsmena igrovyykh vidov sporta // Uchenye zapiski universiteta imeni P.F. Lesgafta. – 2012. – № 3(85). — P. 86 — 90.
89. Karaulova N.I. Vozmozhnosti ispol'zovaniya reaktsii na dvizhushchiysya ob"ekt v otsenke rezul'tatov trenirovki // Fiziologiya cheloveka. – 1982. – Т. 8. № 4. — P. 653 — 659.
90. Koryagina Yu.V. Razvitie spetsificheskikh vidov sensomotornykh reaktsiy v trenirovochnom protsesse badmintonistov // Omskiy nauchnyy vestnik. – 2008. – № 63. — P. 142 — 144.
91. Polevshchikov M.M., Rozhentsov V.V. Competitive Sports Athletes's Ran King Method // European Researcher. – 2012. – V. 23. № 6. — P. 905 — 909.

92. *Primenenie testovykh komp'yuternykh sistem v diagnostike kognitivnykh narusheniy pri sindrome defitsita vnimaniya s giperaktivnost'yu u detey shkol'nogo vozrasta* // *Meditsinskaya tekhnika*. – 2005. – № 1. — P. 7 — 13.
93. Maslov N.B., Bloshchinskiy I.A., Maksimenko V.N. *Neyrofiziologicheskaya kartina geneza utomleniya, khronicheskogo utomleniya i pereutomleniya cheloveka operatora* // *Fiziologiya cheloveka*. – 2003. – Т. 29. № 5. — P. 123 — 133.
94. Петухов И.В. Способ оценки времени реакции человека на движущийся объект: патент № 2369326 Российская Федерация. — 2009. — Бюл. № 28.
95. Rozhentsov V.V. *Sposob otsenki sootnosheniya protsessov возбужdeniya i tormozheniya v tsentral'noy nervnoy sisteme cheloveka* // *Patent Rossii* № 2372032. 2009. *Byul.* № 31.
96. Медик В.А., Токмачев М.С. *Руководство по статистике здоровья и здравоохранения*. – М.: Медицина, 2006. – 528 с.
97. Урбах В.Ю. *Биометрические методы*. – М.: Наука. – 1964.
98. Салей А.П. *Анализ развития сенсорного утомления у машинистов электропоездов в зависимости от возраста и от периода рабочей смены* // *Валеологические вопросы взаимодействия соматосенсорных и вегетативных функций в процессе трудовой деятельности : сборник научных трудов*. — Тверь: Тверской государственный университет, 1999. — С. 78–83.
99. Маслова О.И., Горюнова А.В., Гурьева М.Б. и др. *Применение тестовых компьютерных систем в диагностике когнитивных нарушений при синдроме дефицита внимания с гиперактивностью у детей школьного возраста* // *Медицинская техника*. - 2005. - № 1. - С. 7-13.
100. Маслов Н.Б., Блощинский И.А., Максименко В.Н. *Нейрофизиологическая картина генеза утомления, хронического утомления и переутомления человека оператора* // *Физиология человека*. — 2003. — Т. 29. — № 5. - С. 123—133.
101. Королева Т. П. *Психологический контроль в системе подготовки стрелков-пистолетчиков* // VII Международный научный конгресс «Современный

олимпийский спорт и спорт для всех» : материалы конференции. — Т. 1. — М.: СпортАкадемПресс, 2003. — С. 257–258.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты внедрения диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»
 Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО Московского авиационного
 института
 (национального исследовательского
 университета)
 Д.А. Козорез
 « 14 » мая 2025 г.


АКТ

О внедрении результатов диссертации Баранова Максима Сергеевича в учебный процесс Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Комиссия в составе:

председатель: Директор дирекции института №6 «Аэрокосмический», к.т.н., доцент О.В. Тушавина,

члены комиссии: и.о. заведующего кафедрой 614, доцент, д.т.н. А.Е. Белявский, профессор кафедры 614, д.т.н. Л.Б. Строгонова,

составила настоящий акт о том, что в диссертации Баранова Максима Сергеевича полученные научные результаты, касающиеся бортовой технической системы для поддержания работоспособности космонавтов при выполнении полетных программ на обитаемой лунной базе: математическое обеспечение, характеризующее биомеханику движения человека при выполнении полетных программ на обитаемой лунной базе, система поддержки принятия технической системы для поддержки работоспособности космонавтов, алгоритм обеспечения биологической обратной связи технической системы для поддержки работоспособности космонавтов, используются в учебном процессе кафедры 614 МАИ при преподавании дисциплин «Биомеханика и переносимость ускорений», «Биомеханика», «Специальные главы высшей математики», а также рекомендуются студентам при выполнении ими курсовых и дипломных проектов.

Математический метод преобразования стабилметрических сигналов, математическое обеспечение, учитывающее вектор измененной гравитации, позволяющее проводить новые реабилитационные мероприятия для достижения технического результата за более короткий промежуток времени, пакет прикладных программ для восстановления активной работоспособности, обеспечивающий полный контроль запуска программных

тренировок с биологической обратной связью, контрольной оценке восстановления работоспособности на лабораторном образце технической системе с биологической обратной связью, отображающей результат правильного положение центра тяжести человека внутри элюры, структуру системы поддержки принятия решений при восстановлении активной работоспособности экипажа в условиях измененной гравитации, реализованные в математическом и программном обеспечении, разработанные Барановым Максимом Сергеевичем при выполнении диссертационной работы позволяют студентам более полно осваивать систему медико-технического обеспечения, входящую в состав конструкции и проектирования летательных аппаратов.

Председатель комиссии
Члены комиссии





О.В. Тушавина
А.Е. Белявский
Л.Б. Строгонова

« 12 » мая 2025 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
и.о. директору ФГБУ «ФНКЦ КМиБ» ФМБА России



И.В. Кошель
2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Баранова Максима Сергеевича, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

- главный научный сотрудник Отдела управления рисками здоровью и работоспособности космонавтов Бинги Владимир Николаевич,

- ведущий научный сотрудник Отдела комплексной оценки здоровья космонавтов Маркеев Игорь Иванович,

составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в диссертационной работе «Разработка бортового тренажерного комплекса с динамической опорной конструкцией для повышения показателей качества работы сенсомоторной системы космонавта на Луне» Баранова Максима Сергеевича, представленные в виде математического обеспечения, системы «ТРУД-ОТДЫХ», узла биологической обратной связи и новой динамической опорной конструкции, могут быть использованы в разработке программного обеспечения и эксплуатации симуляционного тренажерного комплекса (тренажера планетной базы).

Практическое применение научных результатов диссертационной работы Баранова Максима Сергеевича позволило сформулировать и реализовать предложения по созданию адаптационно-реабилитационного комплекса для выполнения программных тренировок и коррекции режима труда и отдыха.

Проведенная работа позволила повысить эффективность тренажерного бортового тренажерного комплекса на 20 %.

Кроме того, полученные Барановым М.С. результаты используются в процессе научно-технического сопровождения перспективных технических средств для симуляционного тренажерного комплекса (тренажера планетной базы).

Главный научный сотрудник Отдела
управления рисками здоровью и
работоспособности космонавтов



В.Н. Бинги

Ведущий научный сотрудник Отдела
комплексной оценки здоровья
космонавтов



И.И. Маркеев