

МГУ имени М.В. Ломоносова

Кафедра прикладной механики и управления

№ госрегистрации
121072300086-8

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК

531.396 Относительное движение систем твердых тел

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Анализ и синтез динамики управляемых систем в экстремальных
ситуациях. 2021-2025
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Александров В.В.

«__» _____ Г.

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий кафедрой, кандидат физико-математических наук, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре

_____ (Александров В.В.)

Исполнители темы:

младший научный сотрудник

_____ (Белоусова М.Д.)

младший научный сотрудник

_____ (Бугрий Г.С.)

доцент, кандидат физико-математических наук

_____ (Бугров Д.И.)

профессор, доктор физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности

_____ (Влахова А.В.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре

_____ (Волков А.А.)

доцент, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре

_____ (Кручинин П.А.)

ассистент, кандидат физико-математических наук

_____ (Кручинина А.П.)

доцент, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре

_____ (Куликовская Н.В.)

профессор, доктор физико-математических наук

_____ (Лемак С.С.)

старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук

_____ (Магомедов М.Х.)

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Муратова Е.А.)

доцент, кандидат физико-математических наук, доцент по кафедре

_____ (Степаненко Н.П.)

научный сотрудник

_____ (Сухочев П.Ю.)

научный сотрудник

_____ (Чертополохов В.А.)

доцент, кандидат физико-математических наук

_____ (Шуленина Н.Э.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

биомеханические системы, минимаксная стабилизация, динамическая имитация, максиминное тестирование, устойчивость

Ключевые слова по-английски:

dynamic simulation, biomechanical systems, minimax stabilization, maximine testing

Работа посвящена разработке и анализу математических моделей управляемых движений технических и биомеханических систем. Наибольшее внимание уделялось следующим вопросам: изучение математических моделей сложных управляемых механических систем с использованием методов фракционного анализа; анализ возможной связи особенностей диффузионного анализа стабилотграмм с областями нечувствительности биосенсоров; исследование задачи удержания человеком равновесия на неустойчивом основании; разработка методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком; разработка алгоритмов динамической имитации для стендов-тренажеров нового типа.

В результате проведенных исследований построена модель переменной структуры, описывающая этапы движения двухосного четырехколесного аппарата на начальном этапе заноса, развивающегося в результате пробуксовки колес ведущей оси. Проведено исследование модели с использованием асимптотических методов. Рассмотрено движение механических систем в линейном по координатам непотенциальном силовом поле. Исследованы случаи, для которых такую систему можно записать в виде классических уравнений малых колебаний консервативной системы с положительно определенной матрицей при вторых производных обобщенных координат и симметрической матрицей позиционных членов.

Исследована возможная связь особенностей диффузионного анализа стабилотграмм с областями нечувствительности биосенсоров. Рассмотрены модели управляемой стабилизации вертикальной позы для фронтального и сагиттального направлений. Проведен диффузионный анализ для ансамбля реализаций численной модели удержания человеком вертикальной позы. Параметры системы управления скорректированы по итогам сопоставления результатов моделирования с натурными данными. На основе численного моделирования показано, что влияние отолитового органа при спокойном стоянии здорового человека в позе "ноги на ширине плеч" во фронтальной плоскости минимально или отсутствует, в сагиттальной же плоскости существуют значения коэффициента усиления сигнала отолита, при которых становится заметно влияние этой составляющей управления.

Исследована задача удержания человеком равновесия на неустойчивом основании. Модель сокращения саркомера в мышце, разработанная в институте механики МГУ, применена для описания работы скелетных мышц при наклонах корпуса человека. Выделена иерархия малых параметров, позволяющая описывать переход от модели одного саркомера к мышце с использованием разделения быстрого и медленного движений.

Продолжена разработка методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком. Метод сравнения разных динамических ситуаций с позиций частотного анализа применен к задаче

сравнения условий на Земле и невесомости. В рамках этого метода рассмотрена возможность сопоставления продолжительной активности человека на основе информации, полученной от инерциальных датчиков. Для анализа использовались методы частотного анализа, векторизация данных и последующая кластеризация. Предложен метод моделирования движения головы задачей оптимального управления. Проведен расчёт гарантированной оценки времен срабатывания алгоритмов детектирования начала движения. Продолжена разработка математической модели формирования и передачи вестибулярной информации. Построена стохастическая математическая модель передачи информации от волосковой клетки (с уровня потенциала мембраны волосковой клетки) до образования спайков первичных нейронов.

Проведена разработка алгоритмов динамической имитации для стендов-тренажеров нового типа. Рассмотрена задача динамической имитации движения лёгкого летательного аппарата на динамическом стенде на базе шестизвенного робота-манипулятора, звенья которого соединены последовательным образом. Подготовлен список воспринимаемых человеком линейных и угловых характеристик движения, определены пороги чувствительности для каждой из них. Рассмотрены несколько различных задач оптимального по быстродействию возврата конечного эффектора в центр рабочей области при наличии ограничений на ускорение, его производную, ограничений на обе величины. Сформирован и обучен автоматический классификатор на основе методов машинного обучения, определяющий выполняемый летательным аппаратом манёвр лишь при наличии инерциальных данных с точностью, превышающей 85%. Проведено математическое моделирование процесса имитации движения для некоторых записанных манёвров летательного аппарата с использованием математической модели промышленного робота-манипулятора FANUC M2000iA 900L, вычислены характерные времена фаз имитации некоторых манёвров, проведено исследование возможностей имитации манёвров летательного аппарата с использованием этого манипулятора. Сделан вывод, что для качественной имитации недостаточно лишь плоскопараллельных движений конечного эффектора, нужно строить более сложные движения, чтобы в том числе увеличить продолжительность фазы имитации, имитировать некоторые стимулы, действующие на чувствительные массы человека во время полёта, и при выполнении фазы возврата.

Изучались особенности применения методики максиминного тестирования к задачам тестирования качества динамической имитации. Одной из возникающих задач является построение области достижимости соответствующей управляемой (возмущаемой) системы. Рассмотрена задача построения границы предельной области достижимости линейной стационарной системы третьего порядка с одним управляющим воздействием, ограниченным по абсолютной величине. Для случая, когда характеристическое уравнение однородной части системы имеет один отрицательный вещественный корень и два комплексно-сопряженных корня с отрицательной вещественной частью, получены конечные параметрические соотношения, задающие границу предельной области достижимости.

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проводимых исследований является разработка методов формирования математических моделей сложных управляемых механических систем, проведение анализа и синтеза динамики управляемых систем в экстремальных ситуациях.

Широко использовались методы фракционного анализа движения механических систем. Построена модель переменной структуры, описывающая этапы движения двухосного четырехколесного аппарата на начальном этапе заноса, развивающегося в результате пробуксовки колес ведущей оси. Проведено исследование модели с использованием асимптотических методов. Рассмотрено движение механических систем в линейном по координатам непотенциальном силовом поле. Исследованы случаи, для которых такую систему можно записать в виде классических уравнений малых колебаний консервативной системы с положительно определенной матрицей при вторых производных обобщенных координат и симметрической матрицей позиционных членов.

Исследована возможная связь особенностей диффузионного анализа стабิโลграмм с областями нечувствительности биосенсоров. Рассмотрены модели управляемой стабилизации вертикальной позы для фронтального и сагиттального направлений. Проведен диффузионный анализ для ансамбля реализаций численной модели удержания человеком вертикальной позы. Параметры системы управления скорректированы по итогам сопоставления результатов моделирования с натурными данными. На основе численного моделирования показано, что влияние отолитового органа при спокойном стоянии здорового человека в позе "ноги на ширине плеч" во фронтальной плоскости минимально или отсутствует, в сагиттальной же плоскости существуют значения коэффициента усиления сигнала отолита, при которых становится заметно влияние этой составляющей управления.

Исследована задача удержания человеком равновесия на неустойчивом основании. Модель сокращения саркомера в мышце, разработанная в институте механики МГУ, применена для описания работы скелетных мышц при наклонах корпуса человека. Выделена иерархия малых параметров, позволяющая описывать переход от модели одного саркомера к мышце с использованием разделения быстрого и медленного движений.

Продолжена разработка методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком. Метод сравнения разных динамических ситуаций с позиций частотного анализа применен к задаче сравнения условий на Земле и невесомости. В рамках этого метода рассмотрена возможность сопоставления продолжительной активности человека на основе информации, полученной от инерциальных датчиков. Для анализа использовались методы частотного анализа, векторизация данных и последующая кластеризация. Предложен метод моделирования движения головы задачей оптимального управления. Проведен расчёт гарантированной оценки времен срабатывания алгоритмов детектирования начала движения. Продолжена разработка математической модели формирования и передачи вестибулярной информации. Построена стохастическая математическая модель передачи информации от волосковой клетки (с уровня потенциала мембраны волосковой клетки) до образования спайков первичных нейронов.

Проведена разработка алгоритмов динамической имитации для стендов-тренажеров нового типа. Рассмотрена задача динамической имитации движения лёгкого летательного аппарата на динамическом стенде на базе шестизвенного робота-манипулятора, звенья которого соединены последовательным образом. Подготовлен список воспринимаемых человеком линейных и угловых характеристик движения, определены пороги чувствительности для каждой из них. Рассмотрены несколько различных задач оптимального по быстродействию возврата конечного эффектора в центр рабочей области при наличии ограничений на ускорение, его производную, ограничений на обе величины. Сформирован и обучен автоматический классификатор на основе методов машинного обучения, определяющий выполняемый летательным аппаратом манёвр лишь при наличии инерциальных данных с точностью, превышающей 85%. Проведено математическое моделирование процесса имитации движения для некоторых записанных манёвров летательного аппарата с использованием математической модели промышленного робота-манипулятора FANUC M2000iA 900L, вычислены характерные времена фаз имитации некоторых манёвров, проведено исследование возможностей имитации манёвров летательного аппарата с использованием этого манипулятора. Сделан вывод, что для качественной имитации недостаточно лишь плоскопараллельных движений конечного эффектора, нужно строить более сложные движения, чтобы в том числе увеличить продолжительность фазы имитации, имитировать некоторые стимулы, действующие на чувствительные массы человека во время полёта, и при выполнении фазы возврата.

Изучались особенности применения методики максиминного тестирования к задачам тестирования качества динамической имитации. Одной из возникающих задач является построение области достижимости соответствующей управляемой (возмущаемой) системы. Рассмотрена задача построения границы предельной области достижимости линейной стационарной системы третьего порядка с одним управляющим воздействием, ограниченным по абсолютной величине. Для случая, когда характеристическое уравнение однородной части системы имеет один отрицательный вещественный корень и два комплексно-сопряженных корня с отрицательной вещественной частью, получены конечные параметрические соотношения, задающие границу предельной области достижимости.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Результатом проведенных в 2023 году исследований является разработка методов формирования математических моделей сложных управляемых механических систем, а также проведение анализа и синтеза динамики управляемых систем в экстремальных ситуациях.

С использованием «велосипедной» модели изучалась динамика двухосного четырехколесного аппарата на начальном этапе заноса, развивающегося в результате пробуксовки колес ведущей оси. Для описания взаимодействия колес с опорной плоскостью используются модель трения Кулона, модель бокового увода и неголономная модель. Построена модель переменной структуры, описывающая этапы движения аппарата. Для исследования применяются асимптотические методы и метод фазовой плоскости.

Рассмотрено движение механических систем в линейном по координатам непотенциальном силовом поле. Исследованы случаи, когда такую систему можно записать в виде классических уравнений малых колебаний консервативной системы с положительно определенной матрицей при вторых производных обобщенных координат и симметрической матрицей позиционных членов. Изучены возможности динамического гашения колебаний системы при наличии периодического по времени возмущения.

Рассмотрен метод диффузионного анализа результатов стабилотрии. Известно, что диффузионные функции стабิโลграмм для фронтального и сагиттального направлений различны и их графики в логарифмических осях имеют характерный излом. Предполагается, что этот излом связан с изменением свойств персистентности для различных интервалов времени движения при наличии обратной связи в системе поддержания человеком вертикальной позы. Рассмотрены модели управляемой стабилизации вертикальной позы для фронтального и сагиттального направлений. Эти модели используют модифицированные уравнения движения перевернутого маятника, стабилизируемого ПИД-регулятором по позиционным измерениям. Управление дополнено обратной связью по информации, поступающей от модели отолитового органа, имеющего зону нечувствительности. Предполагается, что сигнал вертикального канала отолитов и полукружных каналов являются подпороговыми и системой управления не воспринимаются. Получены результаты диффузионного анализа для ансамбля реализаций численной модели удержания человеком вертикальной позы. Параметры системы управления скорректированы по итогам сопоставления результатов моделирования с натурными данными. Численное моделирование показало, что влияние отолитового органа при спокойном стоянии здорового человека в позе «ноги на ширине плеч» во фронтальной плоскости минимально или отсутствует, в сагиттальной же плоскости существуют значения коэффициента усиления сигнала отолита, при которых становится заметно влияние этой составляющей управления. Представленное моделирование позволяет наметить основные направления для анализа связи показателей диффузионного анализа стабิโลграмм с особенностями функционирования как вестибулярного аппарата, так и других сенсорных модальностей.

Модель сокращения саркомера в мышце, разработанная в институте механики МГУ, применена для описания работы скелетных мышц при наклонах корпуса человека. Модель учитывает, что мышечные усилия, создаются миозиновыми мостиками, взаимодействующими с актиновыми нитями в

миофибрилах мышц. Входом модели является скорость притока ионов кальция в мышечные клетки, которая предполагается пропорциональной потенциалу мотонейронов. Выделена иерархия малых параметров позволяющая описывать переход от модели одного саркомера к мышце с использованием разделения быстрого и медленного движений.

Продолжена разработка методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком. При построении динамических систем, например тренажеров, значимая часть задач связана с анализом возможностей взаимодействия человека с технической системой, сравнение работы человека в разных условиях, в том числе экстремальных.

В текущем периоде был разработан и применён метод сравнения разных динамических ситуаций с позиций частотного анализа. Предложенный метод применен к задаче сравнения условий на Земле и невесомости. В рамках этого метода рассматривается возможность сопоставления продолжительной активности человека на основе информации, полученной от инерциальных датчиков. Для анализа используются методы частотного анализа, векторизация данных и последующая кластеризация. Целью данного исследования в конечном является возможность выделения классов ситуаций, при которых развивается укачивание с большей вероятностью.

Работа в измененных условиях, таких как условия невесомости, отличается от работы в условиях некомпенсированной силы тяжести. Для этого продолжался анализ записей поворотов головы, в различных условиях. Разработан метод определения начал и конца поворота. Его работоспособность показана на данных на земле и в невесомости. Вопрос детекции начала движения крайне важен для оценки состояния человека, анализа его работы, формирования предъявляемых ему требований. Ретроспективно абсолютно ясно, что развитие методов и понимания биомеханических процессов сильно изменяет выбор применяемых в задачах инструментов.

Другой связанной задачей является математический анализ биомеханики движений. Движения зависят от потенциального поля сил, и при его изменении могут сильно изменяться, поскольку программное движение, привычный паттерн, оказывается неподходящим для новых условий. Таким образом можно прогнозировать вероятные трудности, которые вероятно возникнут у человека. Для этого рассмотрена математическая модель поворота головы. Применен метод моделирования движения головы задачей оптимального управления. Проведен расчёт гарантированной оценки времен срабатывания алгоритмов детектирования начала движения.

Была продолжена разработка математической модели формирования и передачи вестибулярной информации. Такая модель может быть применена для моделирования разных внешних воздействий, а также моделирования возможных способов коррекции. Построена стохастическая математическая модель передачи информации от волосковой клетки (с уровня потенциала мембраны волосковой клетки) до образования спайков первичных нейронов. Подобное исследование позволит сформировать наилучший путь предсказания глазодвигательного отклика на вестибулярное возмущение, что востребовано для моделирования откликов в нестандартных ситуациях.

Разрабатывались алгоритмы динамической имитации для стендов-тренажеров нового типа. При обучении пилотов управлению летательным аппаратом (ЛА) возникает необходимость использовать специализированные тренажёры, имитирующие органы управления данного ЛА, их отклик на управле-

ние пилота, изображения из окон кабины, и т.д. Такие тренажёры нередко включают в себя стенды для динамической имитации (ДИ). Часто для этого используются стенды опорного типа, представляющие собой платформу, перемещающуюся в пространстве с помощью силовых электрогидравлических цилиндров. Опорой для цилиндров могут служить фундамент, стены или потолок помещения, в котором установлен стенд. Рассмотрена задача динамической имитации движения лёгкого летательного аппарата на динамическом стенде на базе шестизвенного робота-манипулятора, звенья которого соединены последовательным образом. На конце такого манипулятора закреплён оператор, работающий на тренажёре. При этом стенд работает в соответствии с заданным для него кинематическим управлением: сначала строится траектория движения конечного эффектора, реализующая необходимое воздействие на вестибулярный аппарат оператора, а звенья стенда управляются таким образом, чтобы конечной эффектор двигался по этой траектории.

Алгоритмы динамической имитации нередко включают в себя две фазы: фазу имитации движения, и фазу возврата в начальное положение или центр рабочей области. Имитационный стенд начинает свою работу из некоторого начального состояния, например, если это многозвенный манипулятор, то его конечной эффектор находится в центре рабочей области. В процессе имитации движения манипулятор может прийти в состояние, когда выполнение дальнейшей имитации выбранных факторов движения невозможно. И тогда алгоритм переходит к выполнению второй фазы. В это время он также может выполнять имитацию некоторых факторов движения, имитируемых в течение первой фазы. При достижении центра рабочей области стенд снова готов приступить к первой фазе. Набор имитируемых факторов движения может меняться в зависимости от выполняемого манёвра. Их выбор может производиться исходя из динамических возможностей стенда, экспертной оценки разработанных алгоритмов, знаний о чувствительности человека. Рассмотрена имитация вектора перегрузки или его направления. Также, например, можно имитировать вектор или направление вектора угловых ускорений.

Для разработки методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком необходимо определить, какие именно факторы движения наиболее значимы для человека. Поэтому был составлен список воспринимаемых человеком линейных и угловых характеристик движения, определены пороги чувствительности для каждой из них. Однако в процессе исследования появились дополнительные вопросы, например, почувствует ли человек движение, выполняемое с подпороговыми значениями линейных ускорений при значениях рывка (производной ускорения) выше пороговых? Какие дополнительные факторы влияют на чувствительность вестибулярного аппарата человека? Для наклонов головы ясно, что вибрации увеличивают пороги чувствительности. Для связки "линейное ускорение – рывок" ответ на этот вопрос дать не получается. Поэтому были рассмотрены несколько различных задач оптимального по быстродействию возврата конечного эффектора в центр рабочей области, при наличии ограничений на ускорение, его производную, ограничений на обе величины.

Для первой фазы алгоритма ДИ была поставлена задача имитации вектора перегрузки, действующего на пилота во время полёта. Причём для различных манёвров летательного аппарата были определены различные

постановки задачи имитации, чтобы иметь возможность использовать особенности выполняемого движения для улучшения качества разрабатываемых алгоритмов. Однако, чтобы проводить математическое моделирование процесса имитации на реальных полётных данных, их требуется разметить, то есть определить участки, соответствующие различным манёврам. Такая разметка требует большого количества ручного труда, практически невозможна при отсутствии видеоданных. Кроме того, велика вероятность ошибиться в процессе разметки. Поэтому был сформирован и обучен автоматический классификатор на основе методов машинного обучения, определяющий выполняемый летательным аппаратом манёвр лишь при наличии инерциальных данных с точностью, превышающей 85%. Большая часть ошибок классификатора приходится на границы манёвров, поскольку переход между ними происходит плавно, и ни один человек не может точно сказать, в какой момент закончился один манёвр и начался другой.

С использованием вышеописанных результатов было проведено математическое моделирование процесса имитации движения для некоторых записанных манёвров летательного аппарата с использованием математической модели промышленного робота-манипулятора FANUC M2000iA 900L, вычислены характерные времена фаз имитации некоторых манёвров, проведено исследование возможностей имитации манёвров ЛА с использованием этого манипулятора. Определено, что для качественной имитации недостаточно лишь плоскопараллельных движений концевой эффектора, нужно строить более сложные движения, чтобы в том числе увеличить продолжительность фазы имитации, имитировать некоторые стимулы, действующие на чувствительные массы человека во время полёта, и при выполнении фазы возврата.

Приведённые выше результаты необходимы для проведения сравнения динамических ситуаций, формирования методики их сравнения. Для достижения результата необходимо продолжить исследование возможностей имитации движения манипулятора, в том числе подтвердив полученные математическим моделированием результаты экспериментами на реальном стенде. Следует также добавить к рассмотрению алгоритмы динамической имитации, использующие сложные движения концевой эффектора; алгоритмы, имитирующие часть факторов движения на фазе возврата в центр рабочей области. Далее можно будет приступить к исследованию восприятия человеком имитируемых движений, методики их сравнений человеком.

Изучались особенности применения методики максиминного тестирования к задачам тестирования качества динамической имитации. Одной из возникающих задач является построение области достижимости соответствующей управляемой (возмущаемой) системы. Рассмотрена задача построения границы предельной области достижимости линейной стационарной системы третьего порядка с одним управляющим воздействием, ограниченным по абсолютной величине. Для случая, когда характеристическое уравнение однородной части системы имеет один отрицательный вещественный корень и два комплексно-сопряженных корня с отрицательной вещественной частью, получены конечные параметрические соотношения, задающие границу предельной области достижимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2023-м году продолжена работа по разработке методов формирования математических моделей сложных управляемых механических систем с использованием методов фракционного анализа, проведение анализа и синтеза динамики управляемых систем в экстремальных ситуациях.

Построена модель переменной структуры, описывающая этапы движения двухосного четырехколесного аппарата на начальном этапе заноса, развивающегося в результате пробуксовки колес ведущей оси. Проведено исследование модели с использованием асимптотических методов. Рассмотрено движение механических систем в линейном по координатам непотенциальном силовом поле. Исследованы случаи, для которых такую систему можно записать в виде классических уравнений малых колебаний консервативной системы с положительно определенной матрицей при вторых производных обобщенных координат и симметрической матрицей позиционных членов.

Исследована возможная связь особенностей диффузионного анализа стабильности с областями нечувствительности биосенсоров. Рассмотрены модели управляемой стабилизации вертикальной позы для фронтального и сагиттального направлений. Проведен диффузионный анализ для ансамбля реализаций численной модели удержания человеком вертикальной позы. Параметры системы управления скорректированы по итогам сопоставления результатов моделирования с натурными данными. На основе численного моделирования показано, что влияние отолитового органа при спокойном стоянии здорового человека в позе "ноги на ширине плеч" во фронтальной плоскости минимально или отсутствует, в сагиттальной же плоскости существуют значения коэффициента усиления сигнала отолита, при которых становится заметно влияние этой составляющей управления.

Исследована задача удержания человеком равновесия на неустойчивом основании. Модель сокращения саркомера в мышце, разработанная в институте механики МГУ, применена для описания работы скелетных мышц при наклонах корпуса человека. Выделена иерархия малых параметров, позволяющая описывать переход от модели одного саркомера к мышце с использованием разделения быстрого и медленного движений.

Продолжена разработка методики сравнения динамических ситуаций с позиции восприятия информации человеком. Метод сравнения разных динамических ситуаций с позиций частотного анализа применен к задаче сравнения условий на Земле и невесомости. В рамках этого метода рассмотрена возможность сопоставления продолжительной активности человека на основе информации, полученной от инерциальных датчиков. Для анализа использовались методы частотного анализа, векторизация данных и последующая кластеризация. Предложен метод моделирования движения головы задачей оптимального управления. Проведен расчёт гарантированной оценки времен срабатывания алгоритмов детектирования начала движения. Продолжена разработка математической модели формирования и передачи вестибулярной информации. Построена стохастическая математическая модель передачи информации от волосковой клетки (с уровня потенциала мембраны волосковой клетки) до образования спайков первичных нейронов.

Проведена разработка алгоритмов динамической имитации для стендов-

тренажеров нового типа. Рассмотрена задача динамической имитации движения лёгкого летательного аппарата на динамическом стенде на базе шестизвенного робота-манипулятора, звенья которого соединены последовательным образом. Подготовлен список воспринимаемых человеком линейных и угловых характеристик движения, определены пороги чувствительности для каждой из них. Рассмотрены несколько различных задач оптимального по быстродействию возврата концевго эффектора в центр рабочей области при наличии ограничений на ускорение, его производную, ограничений на обе величины. Сформирован и обучен автоматический классификатор на основе методов машинного обучения, определяющий выполняемый летательным аппаратом манёвр лишь при наличии инерциальных данных с точностью, превышающей 85%. Проведено математическое моделирование процесса имитации движения для некоторых записанных манёвров летательного аппарата с использованием математической модели промышленного робота-манипулятора FANUC M2000iA 900L, вычислены характерные времена фаз имитации некоторых манёвров, проведено исследование возможностей имитации манёвров летательного аппарата с использованием этого манипулятора. Сделан вывод, что для качественной имитации недостаточно лишь плоскопараллельных движений концевго эффектора, нужно строить более сложные движения, чтобы в том числе увеличить продолжительность фазы имитации, имитировать некоторые стимулы, действующие на чувствительные массы человека во время полёта, и при выполнении фазы возврата.

Изучались особенности применения методики максиминного тестирования к задачам тестирования качества динамической имитации. Одной из возникающих задач является построение области достижимости соответствующей управляемой (возмущаемой) системы. Рассмотрена задача построения границы предельной области достижимости линейной стационарной системы третьего порядка с одним управляющим воздействием, ограниченным по абсолютной величине. Для случая, когда характеристическое уравнение однородной части системы имеет один отрицательный вещественный корень и два комплексно-сопряженных корня с отрицательной вещественной частью, получены конечные параметрические соотношения, задающие границу предельной области достижимости.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2023 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами