

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Чертополохова Виктора Александровича
на тему: «ВИЗУАЛЬНАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ
ИМИТАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ НА СТЕНДАХ-
ТРЕНАЖЕРАХ»
по специальности 1.1.7. — «Теоретическая механика, динамика машин»

В диссертации В.А.Чертополохова сформулированы и обоснованы научные положения, которые можно квалифицировать как серьезный вклад в развитие важного направления в теоретической механике и динамике машин: проведены исследования закономерностей и особенностей визуальной и динамической составляющих имитации управляемого движения летательного аппарата на стенде-тренажере. Такие системы принято называть «пилотажными комплексами» или «тренажерными устройствами имитации полета». Закономерности и особенности создания стендов-тренажеров, различных по конструкции и законам движения внутренних масс, изучаются многими отечественными и зарубежными исследователями.

Актуальность темы.

Тема диссертации В.А.Чертополохова безусловно актуальна. Система авиатренажеров, должна позволять согласовывать – синхронизировать (в терминах автора работы) визуальную информацию и воспринимаемые летчиком движения. Достоверность моделирования динамики полета складывается из адекватности имитации акселерационных силовых эффектов и адекватности имитации визуальных эффектов. Иначе, например, может быть значительно снижено восприятие опасности сложных этапов движения. Это важная проблема. Адекватность устройств имитации полета является основообразующей концепцией в проектировании авиационного тренажера. Для подтверждения актуальности темы диссертации отмечу недавно

защищенную в МАИ кандидатскую работу: С.Ю.Митрофанова «Алгоритмы обработки информации и управления в тренажерном устройстве имитации полета среднемагистрального самолета», в которой отмечается, что ограниченный анализ движений летчика и того, как визуальное восприятие информации и физические силы используются при управлении, препятствует формированию требований к точности передачи сигналов тренажера, адекватных учету человеческого отклика, присущего процессу имитации полета.

Степень обоснованности и достоверности.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации, подтверждается тем, что текст работы содержит достаточно полное описание проведенных исследований, вывод формул и обоснование расчетных алгоритмов. Кроме того, выводы диссертационной работы согласуются с известными результатами авторитетных исследователей, полученными ранее.

Научная новизна.

Для создания классических тренажеров, способных воспроизводить движение летных аппаратов, в настоящее время используются разнообразные динамические подвижные стенды, например, опорные стенды типа платформы Стюарта. Эти стенды воспроизводят перегрузки и угловые ускорения, возникающие при управлении реальным транспортным средством. Но, современные симуляторы предоставляют еще и визуальную имитацию, что крайне важно при управлении самолетом в разных режимах. Так, одной из наиболее продвинутых разработок в области имитационных систем является применение компактных шлемов виртуальной реальности. В диссертации предложен новый подход к проблемам имитации управляемого движения на стендах-тренажерах. Новый принцип управления имитацией заключается в том, что представлено моделирование полета на тренажерном имитационном стенде, основанное на предварительно проведенном тщательном математическом моделировании функционирования полукружных каналов и

отолитовых органов вестибулярной системы человека. Новизну данного исследования характеризует и использование современных средств так называемой дополненной реальности - созданной техническими средствами среды, ощущаемой человеком через зрение, слух, осязание.

Апробация работы и публикации.

Автореферат (согласованный с текстом введения) в целом отражает содержание диссертации. Основные результаты работы, начиная с 2017 года, докладывались на целом ряде известных семинаров, международных и всероссийских научных конференциях. Элементы данной работы легли в основу зарегистрированного программного обеспечения ряда имитационных систем. Результаты диссертации изложены в 13 печатных работах, 4 из которых опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений, списка литературы. Объем диссертации 161 страница текста с 65 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 117 наименований.

О содержании работы.

Во Введении представлен обзор литературы. Четко выделены работы, наиболее тесно примыкающие к тексту диссертации. Предложен новый подход к построению визуальной и динамической составляющих имитации управляемого движения на стендах-тренажерах.

В Главе 1 анализируется задача динамической имитации управляемого движения стенда-тренажера.

Обращено внимание на связь организации процесса имитации с устройством вестибулярного аппарата человека. Формулируется физическая постановка задачи динамической имитации вектора гравито-инерционных сил, действующих на пилота. Рассмотрены силы, действующие на виртуального пилота в модели самолета и алгоритм динамической имитации ориентации вектора перегрузки. Представлена структура алгоритма динамической

имитации быстрых угловых и линейных движений объектов имитации. Введено понятие рабочей области системы динамической имитации и предложен алгоритм оптимальной остановки на границе рабочей области и возврата в начало координат абсолютного пространства рабочей зоны.

Демонстрируется синтез алгоритмов динамической имитации в задаче моделирования полета с помощью трехстепенной платформы опорного типа. Представлен алгоритм предварительной идентификации геометрических параметров подвижного стенда. Построена граница множества допустимых положений- рабочей области. Реализован алгоритм имитации быстрых линейных и угловых движений.

Экран системы визуализации неподвижен, а изображение корректируется в соответствии с положением платформы. Возникает необходимость точно определять положение платформы в связанной с экраном системе координат. Представлен алгоритм полуавтоматической идентификации параметров модели платформы с помощью внешних измерений системы видеоанализа, маркеры которой установлены на платформе.

Существуют различные по приоритету и сложности режимы динамической имитации. Например, движение самолета по взлетно-посадочной полосе, движение по глиссаде, развороты. Рабочая область системы имитации как системы со связями строится с использованием метода множителей Лагранжа в виде параллелепипеда максимального допустимого объема. Имитация прекращается, когда ускорение становится ниже порога чувствительности вестибулярного аппарата или положение платформы достигает границ рабочей области.

Представленные в первой главе результаты исследований показывают, что построенные алгоритмы динамической имитации, использующие системы «дополненной реальности» обеспечивают качественное моделирование движений стенда-тренажера.

Глава 2 посвящена изложению принципов создания системы визуализации.

Предложен математический аппарат задания преобразований пространства для визуализации «сцены» с учетом положения виртуальной камеры. Для возможности повышения частоты кадров при визуализации использован так называемый фовеальный рендеринг — метод построения изображения, при котором максимальное качество и детализация кадра обеспечиваются лишь в той области кадра, куда смотрит пилот, и представлена его реализация.

В Главе 3 решается задача синхронизации (согласования) визуальной и динамической составляющих имитации.

Изложены методы отслеживания угловых движений человека и стенда с применением оптической системы. Строится прогноз углового движения подвижного стенда с учетом его динамики и времени задержки системы отслеживания движений. Дано сравнение алгоритмов прогнозирования. Проводится построение управления с использованием измерения ускорения и учетом порога чувствительности вестибулярного аппарата человека.

В диссертации применен «интегральный скользящий режим» типа предложенного В.И. Уткиным. Основным преимуществом управления в режиме скольжения является его робастность. Состояние равновесия в режиме скольжения может быть достигнуто за конечное время, хотя при реализации скользящего режима в малой окрестности поверхности скольжения возникает высокочастотное переключение - «чаттер». Движение системы при интегральном режиме скольжения имеет размерность, равную размерности пространства состояний. Траектория системы всегда начинается с поверхности скольжения.

Глава 4 посвящена реализации алгоритмов синхронизации динамической и визуальной составляющих имитации для стенда-тренажера, основанного на комплексе, состоящем из промышленного робота-манипулятора и шлема виртуальной реальности.

Приведена динамическая модель подвижного стенда. Исследована зависимость ускорений расчетной точки от перемещений звеньев манипулятора. Представлено решение задачи определения области активной

фазы динамической имитации и смоделирована работа алгоритма согласования визуальной и динамической имитации. Здесь существенно обобщаются результаты работы «Задача динамической имитации полета летательного аппарата на робототехническом стенде» С.С.Лемака с соавторами, которая в свою очередь, может рассматриваться как обобщение классической задачи о брахистохроне. Дан алгоритм управления остановкой на границе множества допустимых положений и возврата в рабочую зону. Реализовано скользящее управление с применением регуляризации на границе множества допустимых положений.

При отсутствии полной информации об управляемой динамической системе основная проблема состояла в построении приемлемого управления, которое, обладая малой чувствительностью по отношению к какому-либо неизвестному (непредсказуемому) фактору, учитывает их возможный набор. При наличии любого рода неопределенностей (параметрического типа, несмоделированной динамики, внешних возмущений и т. д.) основным способом получения решения, подходящего для класса заданных моделей, является постановка соответствующей минимаксной задачи, где максимизация берется по множеству неопределенностей; минимизация осуществляется по управляющим воздействиям в пределах заданного их множества. В диссертации предложена методика максиминного тестирования качества управления и показано её использование для проверки робастности предложенного управления.

Замечания оппонента.

Существенных замечаний по тексту диссертации нет. Ряд вопросов, возникающих по ходу чтения работы, скорее относится к разряду пожеланий автору диссертации, связанных с выбором тем дальнейших исследований, или носит «вкусовой характер».

1. Название диссертации носит чрезмерно общий характер и, вследствие этого, не вполне отражает своеобразие и оригинальность работы.

2. В первой главе (стр.27) автор сообщает, что «в реальной практике создания тренажерных систем применяется следующий подход: данные о перегрузке и угловой скорости фильтруются с помощью фильтра высоких и низких частот», и делает ссылку на «Руководство по критериям квалификационной оценки тренажерных устройств имитации полета. Том 1. Самолеты. Издание четвертое.— ИКАО, 2015». Эта идея используется в диссертации при формировании типового алгоритма динамической имитацией. Это, вообще говоря, разумно, и подтверждается практикой. Но, не упускается ли при этом случай возникновения быстрых внутренних «пограничных слоев» при существенных внезапных изменениях ускорения. Ведь система нелинейна, а ее параметры могут медленно изменяться во времени, приводя к чему-то вроде бифуркации Хопфа и смене устойчивого режима.

3. В первой главе, при описании трехстепенной подвижной платформы из Панорамной системы виртуальной реальности МГУ (стр.30), хотелось бы (в какой-либо форме) видеть ее изображение. Отсутствие такого изображения понятно, поскольку автор диссертации прекрасно знаком со всеми ее особенностями, но мне как оппоненту пришлось обратиться к диссертации С.М.Зуева «Стабилизация положений равновесия нагруженных модификаций платформы Стюарта» (СПГУ, 2014), чтобы полностью согласиться с уравнениями В.А.Чертополохова.

В целом рецензируемая диссертация безусловно представляет собой серьезное квалифицированное исследование теоретических и прикладных аспектов важной задачи теоретической механики и, в целом, динамики машин. Основные результаты диссертации могут быть непосредственно использованы в Институтах РАН, ведущих университетах и как теоретическая база для создания алгоритмов решения новых задач движения современных имитационных стендов. Сделанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует специальности 1.1.7. – «теоретическая механика, динамика машин» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Чертополохов Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. — «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин Института Энергомашиностроения и Механики Национального Исследовательского университета «МЭИ», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования,

Кобрин Александр Исаакович

Контактные данные: тел.:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.02.01 – «теоретическая механика».

Адрес места работы: 111250, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14 НИУ «МЭИ

Тел.: +7 495 362-70-01; e-mail: universe@mpei.ac.ru

