

На правах рукописи



САПУНОВ Евгений Александрович

**СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЕСТИСТЕПЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ
СТЕНДОВ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ**

**Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия» на кафедре «Автоматизация и управление».

- Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Прошин Иван Александрович
- Официальные оппоненты **Прохоров Сергей Антонович**,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАЕН,
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королева (национальный исследователь-
ский университет)», заведующий кафедрой
«Информационные системы и технологии»,
Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»,
заведующий кафедрой «Математика
и математическое моделирование».
- Ведущая организация – ОАО «Пензенское конструкторское
бюро моделирования», г. Пенза

Защита состоится 29 ноября 2012 г., в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 при Пензенской государственной технологической академии по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, ПГТА, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия».

Автореферат разослан 26 октября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание современных авиационных тренажёров базируется на математическом моделировании их функциональных узлов и систем: динамических стендов, гидро- и электро- приводов, систем управления как в целом авиационным тренажёром, так и системой приводов и отдельными приводами динамических стендов.

Большой вклад в развитие методов моделирования и проектирования тренажёров внесли ведущие организации нашей страны, такие как: ФГУП “Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского”, ОАО “Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова”, ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем” и др. У истоков развития авиационного тренажёростроения стояли зарубежные ученые: Х.Ф. Хидстон, Ф. Стенли, Ш. Конрад, Б. Конрад, З. Гератеволь и др. Среди отечественных ученых, внесших существенный вклад в теорию и практику тренажёростроения, следует отметить А.Н. Базилевского, А.И. Годунова, Д.А. Сотникова, Г.А. Мееровича, Е.А. Деревянко, В.Т. Мыльников, А.Н. Предтеченского, А.Г. Бюшгенса, В. Шукшинова и др.

Несмотря на значительные успехи в развитии теории и техники тренажёростроения, при решении задачи моделирования управляемых динамических стендов возникают некоторые требующие разрешения противоречия, проявляющиеся в недостаточной точности известных методов.

Это обуславливает актуальность решаемой в работе научной задачи, состоящей в совершенствовании средств математического моделирования динамических стендов авиационных тренажеров.

Цель работы – создание системы компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажёров, обладающей повышенной точностью имитации акселерационных воздействий, с расширенными функциональными возможностями.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Анализ и разработка методов имитационного и математического моделирования привода шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией веса подвижной платформы и установленного на ней оборудования.

2. Разработка алгоритмов и методики моделирования шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с гидро- и электроприводами.

3. Разработка комплекса программ моделирования шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера.

4. Проведение комплексных исследований шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров по предложенной методике на основе разработанного комплекса программ. Разработка рекомендаций по практическому применению результатов проведенных исследований.

Объект исследования – шестистепенной динамический стенд авиационного тренажера.

Предмет исследования – математические методы моделирования шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера.

Методы исследований – методы математического анализа динамических систем, методы математического и имитационного моделирования, численные методы, компьютерно-имитационное моделирование.

Научная новизна.

1. Разработан метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией веса подвижной платформы.

2. Разработан алгоритм моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров, объединяющий процедуры исследования законов движения и оценки соответствия параметров движения подвижной платформы заданным техническим требованиям и критериям.

3. Созданы метод имитационного моделирования и алгоритм численного формирования управляющих воздействий и управляемых координат в имитационной модели замкнутого по перемещению привода n -го порядка динамического стенда авиационного тренажера.

4. Разработан метод численного формирования эталонной модели динамической системы, отличающийся тем, что для задания соответствующих техническим требованиям к приводу свойств, введён коэффициент демпфирования.

5. Разработан комплекс программ моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажёров, обеспечивающий моделирование режимов компенсации веса подвижной платформы.

Практическая значимость.

Применение разработанных методов моделирования динамических стендов авиационных тренажеров, выработанных рекомендаций по их практическому использованию позволяет повысить точность имитации акселерационных воздействий и улучшить на этой основе качество подготовки авиационных специалистов.

Внедрение результатов работы.

Материалы диссертационной работы внедрены в ООО “Научно-производственная фирма “КРУГ”, г. Пенза, и использованы в учебном процессе Пензенской государственной технологической академии на кафедре “Автоматизация и управление”.

Достоверность результатов работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математических методов, экспериментальными исследованиями, внедрением на промышленном предприятии, апробацией на всероссийских и международных научных конференциях.

На защиту выносятся.

1. Система компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров, в том числе методика матема-

тического моделирования замкнутого привода динамического стенда n -го порядка, методика моделирования шестистепенного динамического стенда.

2. Метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией статической нагрузки.

3. Метод имитационного моделирования и алгоритм численного формирования управляющих воздействий и управляемых координат в имитационной модели замкнутого по перемещению привода динамического стенда авиационного тренажера, а также метод численного формирования эталонной модели динамической системы.

4. Комплекс программ моделирования шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера, обеспечивающий исследование приводов с компенсацией и без компенсации статической нагрузки при вариации законов движения, а также результаты их моделирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на шестой Всероссийской научной конференции с международным участием “Математическое моделирование и краевые задачи” (Самара, 2009 г.); на третьей международной научно-практической конференции “Информационные технологии в образовании, науке и производстве” (Серпухов, 2009 г.); на международной научно-технической мультikonференции “Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники” (Геленджик, 2009 г.); на первой международной научно-технической интернет-конференции “Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2009)” (Пермь, 2009 г.); на второй Всероссийской научной конференции с международным участием “Научное творчество XXI века” (Красноярск, 2010 г.); на второй международной молодежной научной конференции “Молодежь и XXI век” (Курск, 2010 г.); на втором международном симпозиуме “Space & Global Security of Humanity” (Латвия, Рига, 2010 г.); на двадцать четвертой международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях” (Пенза, 2011 г.); на второй международной научной конференции “Проблемы управления, обработки и передачи информации” (Саратов, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: [4, 8, 10, 11] – предложен метод имитационного моделирования замкнутого по перемещению привода динамического стенда авиационного тренажера; [3, 7, 9, 14, 16] – разработан метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией веса подвижной платформы; [15] – разработан комплекс программ моделирования; [1] – разработан алгоритм моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров; [2, 5, 6, 12, 13] – получены результаты моделирования приводов динамического стенда.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, основных результатов и выводов по работе, списка использованных источников, включающего 146 наименований. Текст изложен на 165 страницах, содержит 119 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, указаны научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ методов математического моделирования движения платформы шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера (АТ). С точки зрения кинематики, математическое моделирование системы приводов динамического стенда можно проводить без учёта их взаимного влияния. Однако, с точки зрения динамики, изменение длины штока одного цилиндра влечет за собой изменения длин штоков всех остальных цилиндров. Следовательно, для задания в модели положения подвижной платформы шестистепенного динамического стенда АТ в процессе моделирования необходимо обеспечить взаимосвязанное управление всеми шестью приводами. Это обуславливает необходимость разработки методов математического моделирования систем приводов как единого взаимосвязанного комплекса.

Рассмотрены методы математического моделирования ориентации в пространстве подвижной платформы шестистепенного динамического стенда. За основу при моделировании движения подвижной платформы принят метод углов Эйлера, заключающийся в последовательных поворотах платформы вокруг осей координат. В результате анализа публикаций по моделированию летательных аппаратов выбран порядок поворотов платформы вокруг осей координат: $Z-Y-X$.

Известные методы математического моделирования не обеспечивают всестороннего исследования различных вариантов имитаторов акселерационных воздействий, в том числе динамических стендов с компенсацией веса подвижной платформы и установленного на ней оборудования.

Обзор современных комплексов программ математического моделирования показывает, что существующие программные средства не позволяют проводить всесторонние исследования шестистепенных динамических стендов и приводов в их составе. Это обуславливает необходимость разработки новых программ, позволяющих проводить комплексные исследования шестистепенных динамических стендов.

В результате проведенного в первом разделе анализа структур приводов, методов и комплексов программ математического моделирования шестистепенных динамических стендов и приводов в их составе очерчен круг задач, решаемых при создании системы компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров с расширенными возможностями математического моделирования имитаторов акселерационных воздействий.

Второй раздел направлен на разработку метода математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда АТ с компенсацией веса подвижной платформы.

На рисунке 1 показана схема шестистепенного динамического стенда АТ. Нижние шарниры $B1...B6$ неподвижны и имеют постоянные координаты $(x1б, y1б, z1б)...(x6б, y6б, z6б)$ соответственно, а подвижные верхние шарниры $A1...A3$ – переменные координаты $(x1а, y1а, z1а)...(x3а, y3а, z3а)$.

Ориентация платформы шестистепенного динамического стенда АТ описывается матрицей

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где φ, θ, ψ – углы крена, тангажа и рыскания соответственно при движении платформы.

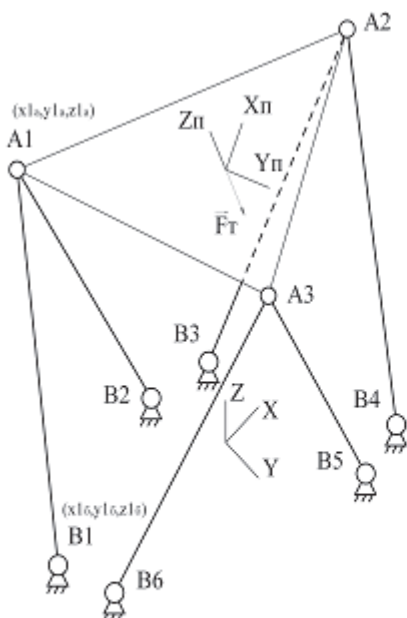


Рисунок 1 – Схема шестистепенного динамического стенда

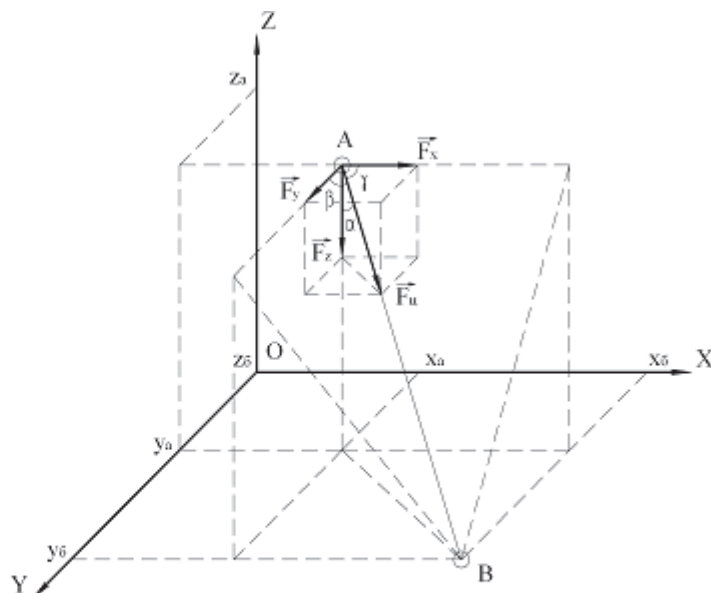


Рисунок 2 – Сила тяжести подвижной платформы, приведенная к оси штока цилиндра

В соответствии с матрицей (1) составляющие силы тяжести подвижной платформы массой m (рисунок 1) в неподвижной системе координат определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} F_z \\ F_y \\ F_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где m – масса подвижной платформы; g – ускорение свободного падения.

Сила тяжести платформы, приведенная к оси штока цилиндра (рисунок 2), вычисляется как сумма трех составляющих (2), приведенных к оси штока цилиндра:

$$F_y = \frac{mg\sqrt{z_a^2 + (y_a - y_b)^2 + (x_a - x_b)^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_a} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_a - y_b} + \frac{\sin|\theta|}{x_a - x_b} \right) \quad (3)$$

Разработан метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда АТ с компенсацией веса подвижной платформы, который состоит в численном формировании корректирующих воздействий по каждой степени свободы в функции положения цилиндров привода. Метод обеспечивает целостное моделирование привода динамического стенда с учётом взаимодействия отдельных двигателей. Корректирующее воздействие численно равно силе тяжести подвижной платформы, приведенной к оси штока цилиндра (3). Необходимое усилие для перемещения подвижной платформы динамического стенда АТ со стороны многодвигательного привода с компенсацией статической нагрузки формируется, исходя из усилия перемещения подвижной платформы и корректирующего воздействия, направленного на компенсацию ее веса (4).

$$\begin{cases} F_{1\delta} = F_{1n} + n_1 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{1a}^2 + (y_{1a} - y_{1b})^2 + (x_{1a} - x_{1b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{1a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{1a} - y_{1b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{1a} - x_{1b}} \right) \\ F_{2\delta} = F_{2n} + n_2 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{2a}^2 + (y_{2a} - y_{2b})^2 + (x_{2a} - x_{2b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{2a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{2a} - y_{2b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{2a} - x_{2b}} \right) \\ F_{3\delta} = F_{3n} + n_3 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{3a}^2 + (y_{3a} - y_{3b})^2 + (x_{3a} - x_{3b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{3a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{3a} - y_{3b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{3a} - x_{3b}} \right) \\ F_{4\delta} = F_{4n} + n_4 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{4a}^2 + (y_{4a} - y_{4b})^2 + (x_{4a} - x_{4b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{4a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{4a} - y_{4b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{4a} - x_{4b}} \right) \\ F_{5\delta} = F_{5n} + n_5 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{5a}^2 + (y_{5a} - y_{5b})^2 + (x_{5a} - x_{5b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{5a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{5a} - y_{5b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{5a} - x_{5b}} \right) \\ F_{6\delta} = F_{6n} + n_6 \cdot \frac{mg\sqrt{z_{6a}^2 + (y_{6a} - y_{6b})^2 + (x_{6a} - x_{6b})^2}}{6} \left(-\frac{\cos\psi\cos\theta}{z_{6a}} - \frac{\sin|\psi|\cos\theta}{y_{6a} - y_{6b}} + \frac{\sin|\theta|}{x_{6a} - x_{6b}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

В формулах приняты обозначения: $F_{1\delta} \dots F_{6\delta}$ – усилия, действующие со стороны двигателей; $F_{1n} \dots F_{6n}$ – усилия, необходимые для перемещения подвижной платформы; $n_1 \dots n_6$ – единичные векторы направления движения штоков цилиндров; $n = -1$ при удлинении штока (при движении платформы вверх), $n = 1$ при укорачивании штока (при движении платформы вниз).

На основе разработанного метода проведено моделирование формирования корректирующих воздействий и усилий со стороны многодвигательного привода. Результаты моделирования приведены на рисунке 3. Координаты платформы изменяются по синусоидальным законам (рисунок 3а), формирование корректирующих воздействий (рисунок 3б) происходит в соответствии с разработанным методом. На рисунке 3в показано сравнение усилий со стороны двигателей с компенсацией веса подвижной платформы и без компенсации. Из рисунка видно, что при движении платформы вверх корректирующее воздействие складывается с формируемой двигателем силой, а при движении платформы вниз – противодействует ей.

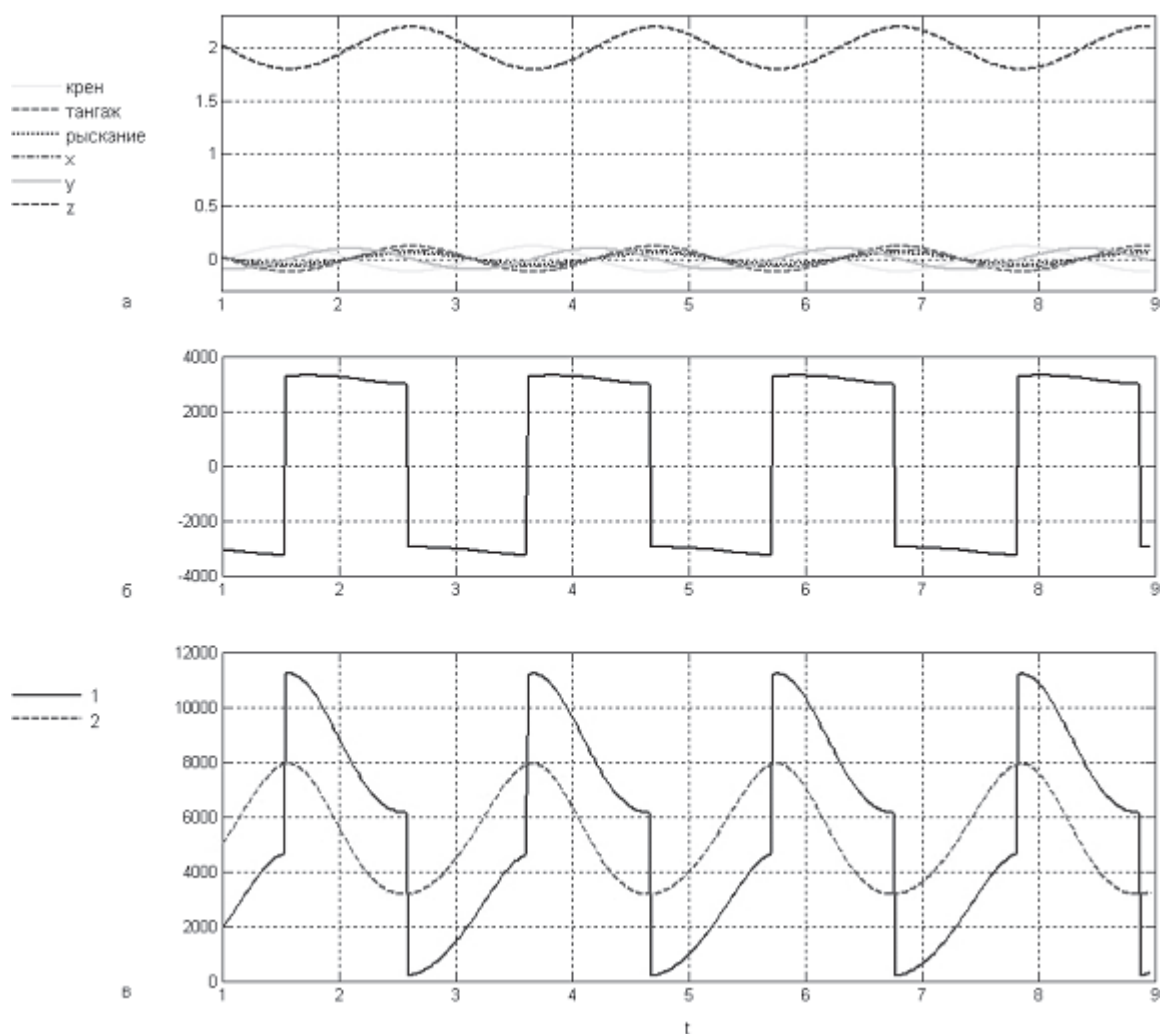


Рисунок 3 – Усилия со стороны приводов с компенсацией и без компенсации веса подвижной платформы

Таким образом, основной результат второго раздела – разработанный метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда АТ с компенсацией веса подвижной платформы, позволяющий моделировать приводы в режимах полной и частичной компенсации веса подвижной платформы.

Третий раздел посвящен разработке методов и алгоритмов имитационного моделирования привода динамического стенда АТ. Целью разработки является расширение возможностей моделирования привода динамического стенда для оценки параметров его движения (перемещения, скорости, ускорения, градиента ускорения) и компонент управляющего воздействия. Разработанный метод имитационного моделирования и алгоритм численного формирования управляющих воздействий отличается тем, что управляющие воздействия в компьютерной модели системы вырабатываются в виде взвешенной суммы n -компонент, пропорциональных i -й производной ошибки по перемещению. Управляемые координаты устанавливаются последовательным интегрированием управляющего воздействия и взвешенной суммы координат состояния привода.

Предложено проводить моделирование замкнутых систем привода динамического стенда авиационного тренажёра на основе математических моделей в комбинированной форме пространства состояний: управляющей части с использованием моделей параллельной структуры, а объекта управления – в виде моделей последовательной структуры. В зависимости от порядка математической модели исполнительного привода выбирается математическая модель управляющей части, обеспечивающая компенсацию динамических свойств привода и придание моделируемой системе требуемых свойств.

Для моделирования замкнутых систем привода динамического стенда АТ с моделью n -го порядка, имеющей в передаточной функции m нулей, при астатизме системы k -го порядка предложен метод формирования математической модели в комбинированной форме пространства состояний (5). Матрица системы в формируемой модели замкнутого привода образована четырьмя частями. Первая часть, обозначенная в квадратных скобках и размещённая в левом верхнем углу матрицы системы, описывает регулятор. Её размерность $(n+l) \times (n+l)$. Вторая часть, также обозначенная в квадратных скобках и размещённая в правом нижнем углу матрицы системы размерности $n \times n$, описывает исполнительный привод. В нижнем левом углу матрицы системы помещённая в круглых скобках часть модели описывает выход регулятора. Верхний правый угол матрицы системы, отмеченный круглыми скобками, описывает обратную связь с выхода замкнутого привода на вход регулятора. Наличие ненулевого элемента в первой строке матрицы системы означает передачу обратной связи на вход регулятора: в последнем столбце – обратную связь по положению, в предпоследнем – по скорости, в $(n+l-2)$ -ом – по ускорению, а в $(n+l-3)$ -ем – по градиенту ускорения.

С целью упрощения процедуры синтеза эталонной модели при компьютерном моделировании динамического стенда АТ разработан метод численного формирования эталонной модели динамической системы, отличающийся тем, что свойства системы, соответствующие техническим требованиям к приводе, задаются посредством коэффициента демпфирования. Такой метод позволяет сократить время синтеза эталонной модели.

$$\begin{bmatrix} v_1^{(1)} \\ v_2^{(1)} \\ \dots \\ v_{n+l-1}^{(1)} \\ v_{n+l}^{(1)} \\ v_{n+l+1}^{(1)} \\ v_{n+l+2}^{(1)} \\ \dots \\ v_{2n+l-1}^{(1)} \\ v_{2n+l}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_{n+l-1}^K - a_{n+l-2}^K \dots - a_1^K - a_0^K \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_{n+l-1} & C_{n+l-2} & \dots & C_1 & C_0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_{n-1}^0 - a_{n-2}^0 \dots - a_1^0 - a_0^0 - C_{n+l} \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_{n+l-1} \\ v_{n+l} \\ v_{n+l+1} \\ v_{n+l+2} \\ \dots \\ v_{2n+l-1} \\ v_{2n+l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ C_{n+l} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y; \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_{2n+l-3} \\ v_{2n+l-2} \\ v_{2n+l-1} \\ v_{2n+l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

На основе разработанного метода имитационного моделирования и алгоритма численного формирования управляющих воздействий и управляемых координат и метода численного формирования эталонной модели динамической системы синтезированы модели систем приводов 4-го, 5-го, 7-го порядков, с одним и двумя нулями и проведено математическое моделирование влияния на отработку законов управления отдельных параметров регулятора при движении платформы динамического стенда АТ с постоянным градиентом ускорения, ускорением, скоростью (рисунок 4). В полученных системах статическая ошибка не превышает 2,2%, перерегулирование – 5%, время регулирования – 0,2 с, время задержки – 0,08 с.

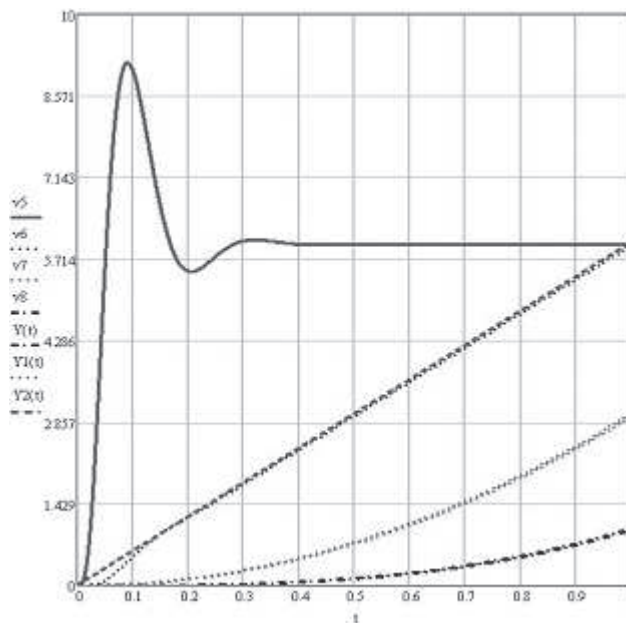
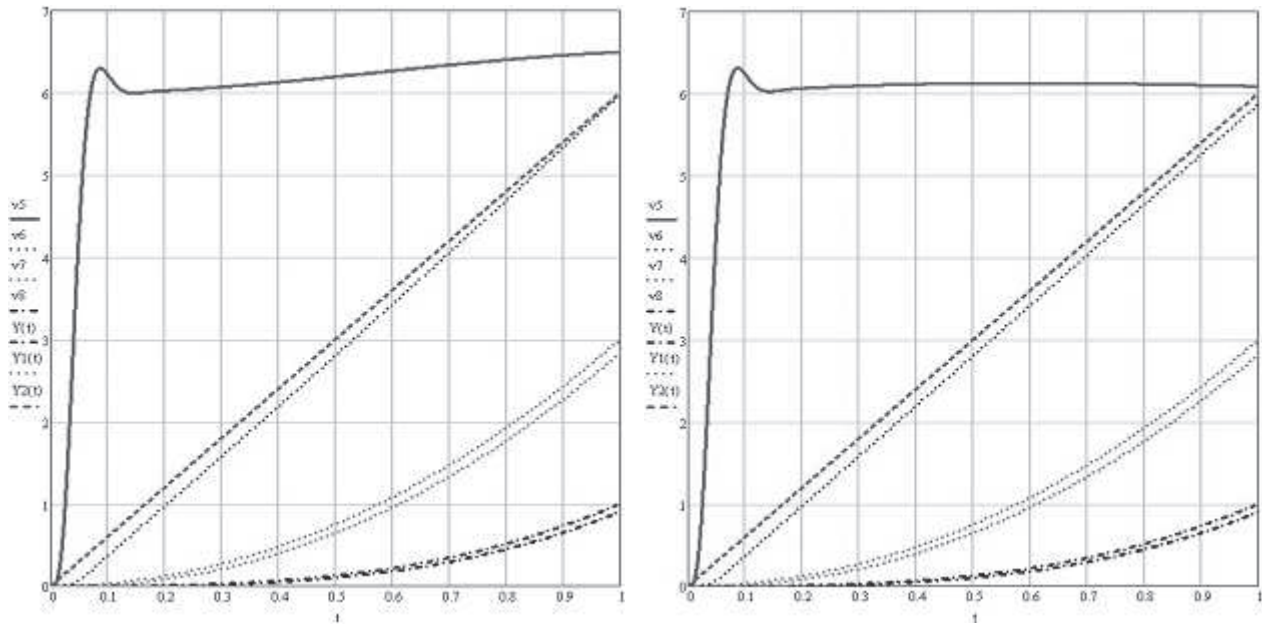


Рисунок 4 – Характеристики системы при изменении параметров регулятора

Из проведенных исследований следует: при обработке перемещений, изменяющихся по закону $y(t) = at^3 / 6$; $y(t) = at^2 / 2$; $y(t) = at$, в системе формируется эталонная переходная характеристика соответственно по градиенту ускорения, ускорению, скорости; увеличение порядка системы приводит к повышению ее колебательности и времени управления; для систем с одним и двумя нулями характерны понижение колебательности, малое перерегулирование, но

повышение времени управления; влияние изменения отдельных параметров регулятора на отработку управляющих воздействий в системе уменьшается с увеличением порядка производной.

Главным результатом третьего раздела является разработанный метод имитационного моделирования и алгоритм численного формирования управляющих воздействий и управляемых координат в имитационной модели замкнутого по перемещению привода динамического стенда n -го порядка.

Четвертый раздел направлен на разработку методик и комплекса программ моделирования и исследования шестистепенных динамических стендов АТ, а также на исследование приводов без компенсации и с компенсацией статической нагрузки в составе шестистепенного динамического стенда АТ.

Разработана методика моделирования шестистепенных динамических стендов АТ, обеспечивающая проведение всесторонних исследований и выбор привода динамического стенда, включающая следующие этапы моделирования: 1) исследование законов движения и оценка параметров движения подвижной платформы; 2) имитационное моделирование привода; 3) выбор группы вариантов привода по результатам имитационного моделирования; 4) исследование и оценка динамических режимов вариантов привода; 5) сопоставительный анализ и выбор наиболее подходящих приводов; 6) моделирование шестистепенного динамического стенда с выбранными вариантами привода; 7) оценка результатов моделирования шестистепенного динамического стенда с выбранными вариантами привода, сопоставительный анализ и выбор оптимального привода шестистепенного динамического стенда.

Создана методика математического моделирования замкнутого привода динамического стенда АТ n -го порядка, обеспечивающая расширение возможностей исследования и оценки координат движения привода динамического стенда при вариации отдельных компонент управляющих воздействий с оценкой их влияния, включающая следующие этапы моделирования: 1) формирование эталонной модели системы; 2) синтез модели регулятора; 3) формирование модели привода; 4) задание управляющих воздействий.

На основе предложенных методик и алгоритмов моделирования шестистепенных динамических стендов АТ и приводов разработан комплекс программ, ориентированный на всестороннее исследование шестистепенного динамического стенда АТ при вариации законов движения приводов с компенсацией и без компенсации статической нагрузки. Разработанный комплекс программ представляет собой многомодульную систему (рисунки 5, 6).

Таким образом, создана система компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажёров (рисунки 7), объединяющая разработанные методы, алгоритмы и комплекс программ, расширяющая возможности математического моделирования имитаторов акселерационных воздействий.

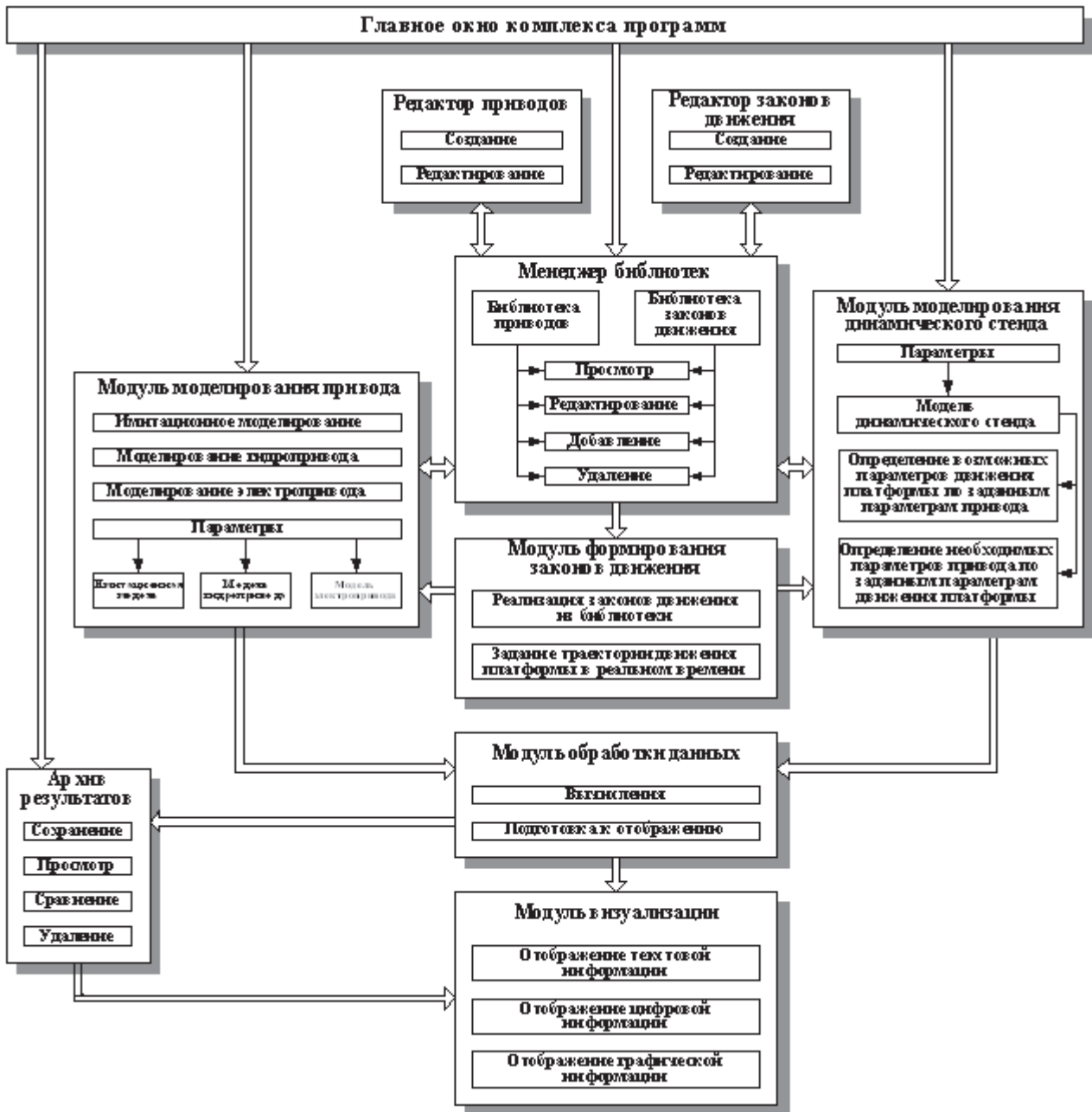


Рисунок 5 – Структурная схема комплекса программ

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность математических моделей, полученных на основе предложенных методов и алгоритмов моделирования шестистепенных динамических стендов АТ и приводов. Область адекватности по градиенту ускорения – до 2 м/с^3 , по ускорению – до 8 м/с^2 , по скорости – до $1,2 \text{ м/с}$. Погрешность моделирования в области адекватности не превышает 10%.

С помощью разработанного комплекса программ проведено исследование приводов без компенсации и с компенсацией статической нагрузки, получено численное подтверждение эффективности применения приводов с компенсацией статической нагрузки в шестистепенных динамических стендах.

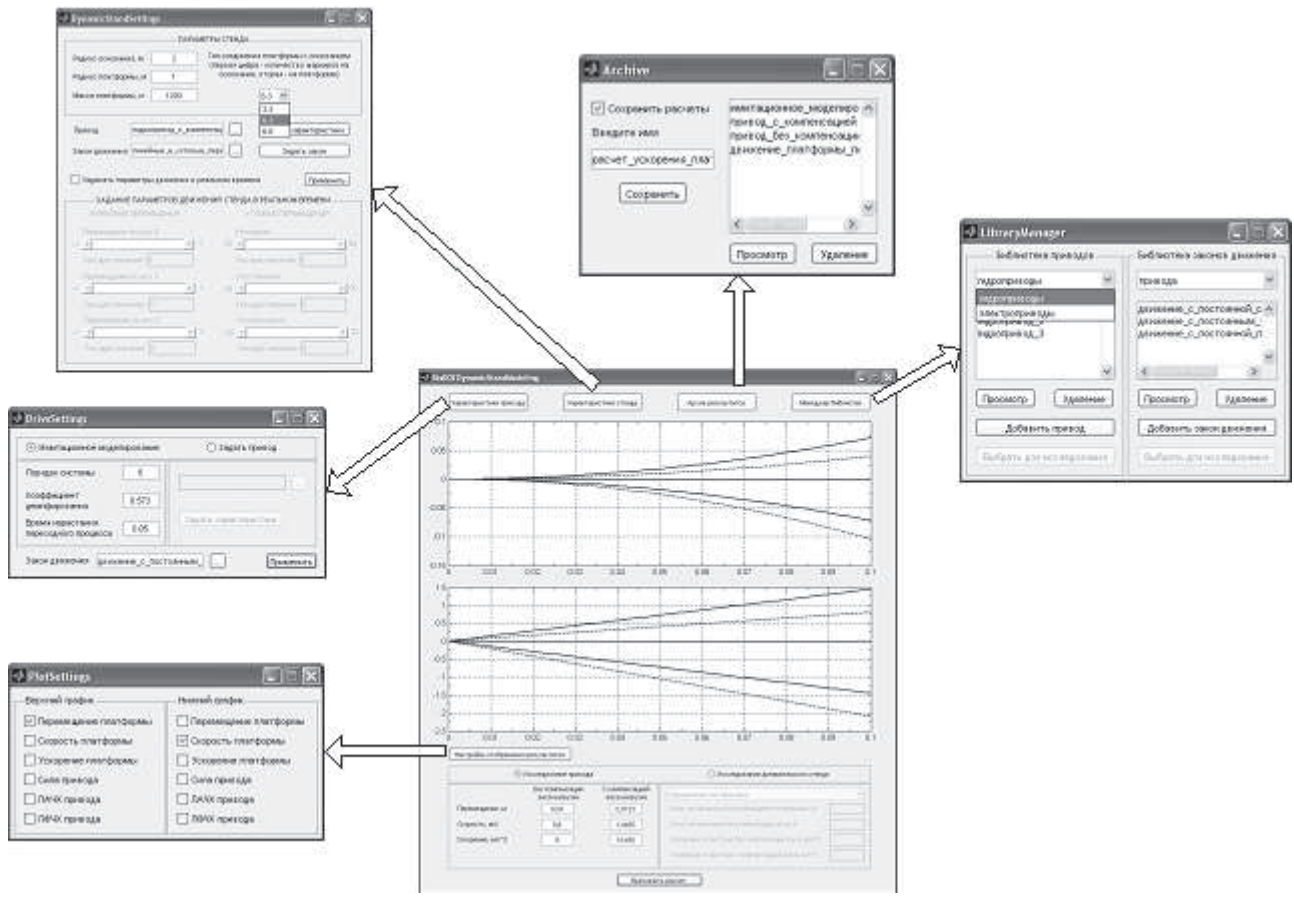


Рисунок 6 – Экранные формы комплекса программ

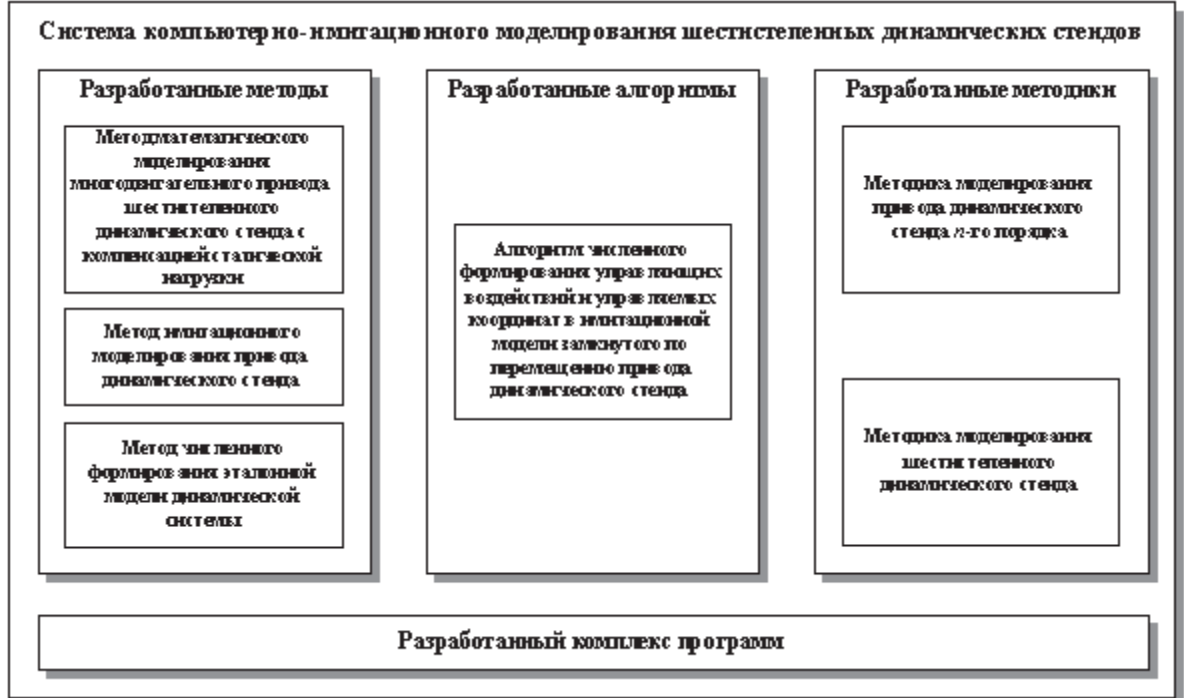


Рисунок 7 – Система компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стенов

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Общий итог работы состоит в том, что решена научная задача создания системы компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажёров, обеспечивающей повышение качества и расширяющей возможности математического моделирования имитаторов акселерационных воздействий.

При решении поставленной задачи получены следующие результаты.

1. Разработан метод математического моделирования многодвигательного привода шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией веса подвижной платформы, обеспечивающий целостное моделирование привода динамического стенда с учётом взаимодействия отдельных двигателей.

2. Разработаны метод имитационного моделирования и алгоритм численного формирования управляющих воздействий и управляемых координат в имитационной модели замкнутого по перемещению привода n -го порядка динамического стенда авиационного тренажера, обеспечивающие повышение эффективности и расширение возможностей моделирования привода динамического стенда, оценку параметров движения привода и компонент управляющего воздействия.

3. Разработан метод численного формирования эталонной модели динамической системы, состоящий в задании технических требований к приводу посредством коэффициента демпфирования, который упрощает процедуру синтеза эталонной модели.

4. Разработан комплекс программ, обеспечивающий комплексное моделирование шестистепенных динамических стендов авиационных тренажеров при вариации законов движения приводов с компенсацией и без компенсации статической нагрузки. Привод с компенсацией веса подвижной платформы позволяет повысить точность отработки задающих воздействий и приблизить создаваемые на динамическом стенде нагрузки к реальным при одновременном уменьшении создаваемых приводом усилий и сохранении быстродействия.

5. Система компьютерно-имитационного моделирования шестистепенных динамических стендов авиационных тренажёров, включающая разработанные методы, алгоритмы и комплекс программ, внедрена в учебный процесс и в производство. Математическое моделирование, экспериментальные исследования, промышленная апробация и эксплуатация созданных методов, методик и программных средств подтверждают высокую эффективность разработанной системы моделирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сапунов, Е.А. Методика моделирования имитатора акселерационных воздействий / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Авиационно-космическое машиностроение. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – Т. 13. – № 1 (2). – С. 334 – 336.

2. Сапунов, Е.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Авиационно-космическое машиностроение. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – Т. 13. – № 1 (2). – С. 337 – 340.

3. Сапунов, Е.А. Анализ шестистепенного динамического стенда авиационного тренажера как объекта математического моделирования / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Научно-технический вестник Поволжья: Сборник научных статей. – Казань, 2011. – № 2. – С. 153 – 157.

Публикации в других изданиях

4. Сапунов, Е.А. Имитационная модель законов управления динамическим стендом авиационного тренажера / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Самара, 2009. – Ч. 2. – С. 148 – 152.

5. Сапунов, Е.А. Моделирование движения динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией нагрузки / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Самара, 2009. – Ч. 2. – С. 152 – 154.

6. Сапунов, Е.А. Следящий гидропривод авиационного тренажера с компенсацией статической нагрузки / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Мехатроника, автоматизация, управление: Труды международной научно-технической мультikonференции “Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники”. – Геленджик, 2009. – С. 267 – 269.

7. Сапунов, Е.А. Способы управления гидроприводами динамического стенда авиационного тренажера / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Мехатроника, автоматизация, управление: Труды международной научно-технической мультikonференции “Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники”. – Геленджик, 2009. – С. 291 – 293.

8. Сапунов, Е.А. Построение имитационной модели законов управления динамическими системами / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: Труды третьей международной научно-практической конференции. – Серпухов, 2009. – Ч. 2. – С. 246 – 248.

9. Сапунов, Е.А. Способ управления гидроприводами динамического стенда авиационного тренажера посредством введения в структуру гидроприводов дополнительных элементов / И.А. Прошин, В.М. Тимаков, Е.А. Сапунов, А.В. Савельев // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2009): Сборник научных трудов первой международной научно-технической интернет-конференции. – Пермь, 2010. – С. 44 – 47.

10. Сапунов, Е.А. Имитационная модель законов управления динамическими системами / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // В мире научных открытий: Материалы второй Всероссийской научной конференции с международным участием “Научное творчество XXI века”. – Красноярск, 2010. – №4 (10). – Ч. 9. – С. 152 – 154.

11. Сапунов, Е.А. Моделирование законов управления динамическими системами / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Молодежь и XXI век: Материалы второй международной молодежной научной конференции. – Курск, 2010. – Ч. 1. – С. 160 – 164.

12. Sapunov, E.A. Mathematical model of a hydraulic drive for a dynamic test stand / I.A. Proshin, V.M. Timakov, E.A. Sapunov, E.V. Hazarov // Space & Global Security of Humanity: Abstracts of the second international symposium. – Riga, Latvia, 2010. – P. 80 – 81.

13. Сапунов, Е.А. Имитационное моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Математические методы в технике и технологиях: Труды XXIV международной научной конференции. – Саратов, 2011. – Т. 6. – С. 99 – 102.

14. Сапунов, Е.А. Структура модели 6-степенного динамического стенда с компенсацией статической нагрузки / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Труды второй международной научной конференции. – Саратов, 2011. – С. 332 – 335.

15. Сапунов, Е.А. Программный комплекс имитатора акселерационных воздействий / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Труды второй международной научной конференции. – Саратов, 2011. – С. 330 – 332.

16. Сапунов, Е.А. Компьютерное моделирование гидропривода авиационного тренажера / И.А. Прошин, Е.А. Сапунов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Труды второй международной научной конференции. – Саратов, 2011. – С. 327 – 330.

САПУНОВ Евгений Александрович

**СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЕСТИСТЕПЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ
СТЕНДОВ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ**

**Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 22.10.12. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Суг.
Усл. печ. л. 1,11. Уч.-изд. л. 1,12. Заказ № 2221. Тираж 100.

Пензенская государственная технологическая академия.
440605, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1^а/11.