Данилов А.М., Лапшин Э.В., Гущина А.А.

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Предлагаются методологические принципы создания авиационных тренажеров с использованием многопроцессорных информационно-вычислительных комплексов с распараллеливанием вычислительных процессов в реальном масштабе времени. Приводится их реализация при разработке тренажера транспортного самолета.

Концепция модульности предполагает возможность объединения, разделения и модификации отдельных элементов без их влияния на систему в целом [1-6]. При модульной архитектуре систем модули могут создаваться независимо друг от друга и объединяться в блоки для получения необходимых результатов. Многие элементы модульности (модули пилотажных приборов, силовой установки, подвижности; кабина, вычислитель, пульт инструктора и др.) уже используются в современных тренажерах. Однако до последнего времени объединение модулей традиционно требовало больших временных и финансовых затрат (иногда ожидаемая выгода не достигалась или требовались чрезмерные усилия). Так, во многих пилотажных приборах используются аналоговые данные, а в ряде других приборах и вычислителях используются цифровые данные. Налицо обмен в АТ большими потоками различной информации. Наибольшие трудности связаны с необходимостью выполнения всех операций в реальном масштабе времени.

Модульный подход, облегчая некоторые трудности, налагает дополнительные ограничения, связанные с приведением данных в совместимую форму, на систему в целом. Однако, если указанные проблемы будут решены, то присущая модульному подходу гибкость будет значительно перекрывать указанные ограничения по обработке данных. Вычисления могут распределяться между различными процессорами.

Существует потенциальная опасность выбора узкоспециализированного подхода с определением некоторой архитектуры ЭВМ и установкой жесткой структуры интерфейса с применением специального языка программирования. Должна существовать возможность создания новых необходимых модулей на основе единого подхода для обеспечения совместимости модулей друг с другом.

При модульном подходе модули и интерфейс могут рассматриваться с функциональной точки зрения (логический уровень), или система рассматривается как набор аппаратных и программных модулей (физический уровень). Указанное разделение позволяет достичь основной цели - разделить указанные уровни так, чтобы изменения на одном уровне не вызывали изменений на другом. Так, можно модернизировать модули акселерационных эффектов, визуализации, установить другие ЭВМ и т.д. без изменения логической структуры АТ или наоборот, использовать различные элементы физического уровня для создания конкретных АТ.

Решение вопроса о взаимодействии модулей на самом деле является решением задачи передачи данных от модуля к модулю. Для их связи необходима схема сопряжения (в идеале - универсальная).

Специального рассмотрения при модульном подходе требует вопрос программного обеспечения. Наибольшие усилия затрачены на обеспечение мобильности программного обеспечения. Доля стоимости математического обеспечения в общей стоимости АТ постоянно возрастает. Поэтому повышение эффективности труда программиста становится все более важной.

Во избежание сложности внедрения технических новшеств требования к модулям, интерфейсу и др. не должны быть чрезмерно жесткими и замыкаться на существующих технологиях. Залог успеха – в создании достаточно гибких модулей и системы в целом. Модуль должен определяться функционально. Типы используемых ЭВМ, длина слов, язык программирования и т.п. не должны входить в определение модуля. При определении модулей, интерфейса, утверждении стандартов (для исключения разногласий) головная организация, координируя деятельность подрядчиков, должна исполнять и роль эксперта.

Рассмотренный подход использовался при разработке ряда комплексных тренажеров самолетов Ил-76МД, Ил-96-300, Ту-204, Ан-72, Ан-74 и др., широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.

Ограничимся рассмотрением модульного построения архитектуры комплексного тренажёра на примере тренажёра самолёта Ту-204.

В состав тренажёра входят: - кабина с рабочими местами двух пилотов, бортинженера и инструктора, устанавливаемая на шестистепенном стенде имитатора акселерационных эффектов; - базовый вычислитель, включающий пять ЭВМ и устройство комплексирования; - модуль информационного обмена, состоящий из пяти стоек абонентских терминалов, расположенных вне кабины, и двух стоек - в кабине; - модуль имитатора визуальной обстановки, включающий генератор изображения и модуль отображения визуальной обстановки; - рабочее место инструктора вне кабины тренажёра; две стойки с бортовыми ЦВМ; - модуль имитатора метеонавигационной радиолокационной станции МНРЛС-85; - модуль общего электропитания с автономным комплектом первичного электропитания для базового вычислителя тренажёра; - модуль кондиционирования воздуха в кабине тренажёра.

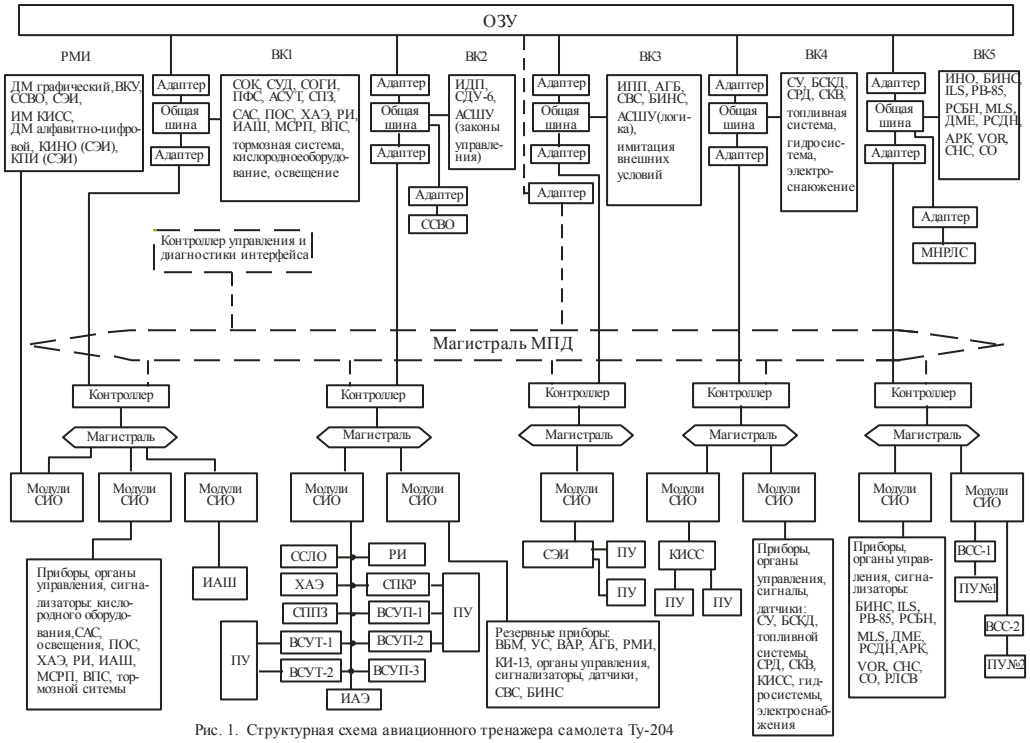


Рис. 1. Структурная схема авиационного тренажера самолета Ту-204

На рис. 1 приводится модульная структура комплексного тренажёра самолёта Ту-204.

Приняты следующие обозначения: АГБ - авиагоризонт бомбардировщика, АРК - автоматический радиокомпас, АСУТ - автоматическая система управления тягой, АСШУ - автоматическая система штурвального управления, БИНС - бесплатформенная инерциальная навигационная система, БСКД - бортовая система контроля двигателей, ВАР - вариометр, ВБМ-2 - указатель барометрической высоты, ВКУ ССВО - видеоконтрольное устройство синтезирующей системы визуальной обстановки, ВК1(2,3,4,5) - вычислительный комплекс №1 (№2, №3,№4,№5), ВОР - радиотехническая система ближней навигации по маякам ВОР, ВПС - взлетно-посадочные средства, ВСС, ВСУП, ВСУТ - вычислительные системы самолетовождения, управления полетом и тягой соответственно, ДМ - дисплейный модуль, ДМЕ - радиодальномер, ИАШ, ИАЭ ИПП - имитаторы акустических шумов, акселерационных эффектов и пилотажных приборов соответственно, ИМ КИСС - индикатор многофункциональный комплексной информационной системы сигнализации, КИНО - комплексный индикатор навигационно-тактической обстановки, КИСС - комплексная информационная система сигнализации, КИ-13 - магнитный компас, КПИ - комплексный пилотажный индикатор, МНРЛС - метеонавигационная радиолокационная станция, МПД - модуль передачи данных, МСРП - магнитный самописец речи и параметров, ПОС - противообледенительная система, ПУ - пульт управления, РВ-85 - радиовысотомер, РИ - речевой информатор, РМИ - рабочее место инструктора, РМИ-2Б – радиомагнитный индикатор, РСБН, РСДН - радиотехнические системы ближней и дальней навигации соответственно, САС, СВС, СДУ-6, СИО, СНС - системы аварийной сигнализации, воздушных сигналов, дистанционного управления, информационного обмена и спутниковая навигационная система сответственно, СО - самолетный ответчик, СОК - система объективного контроля, СПКР, СППЗ, СРД, ССЛО - системы предупреждения критических режимов, предупреждения о приближении к земле, регулирования давления, сбора и локализации отказов соответственно, СУ - силовая установка, СУД, СЭИ - системы управления двигателями и электронной индикации соответственно, УС - указатель скорости, ХАЭ - хронометр авиационный электронный. ILS - радиотехническая система посадки по маякам ИЛС/СП, MLS - микроволновая система посадки.

Возможны два варианта модульного построения АТ.

В первом (связи показаны сплошными линиями) к каждому ВК через интерфейс типа "Общая шина" подключается контроллер одной стойки абонентских терминалов с модулями СИО и используемым бортовым оборудованием. К каждой стойке абонентских терминалов бортовое оборудование подключается с учетом задач, решаемых вычислительным комплексом. Например, в ВК2 решаются задачи модуля динамики полёта, системы дистанционного управления, автоматической системы штурвального управления.

К стойке абонентских терминалов, взаимодействующих с ВК2, подключаются органы управления полётом, бортовое оборудование (систем, связанных с ВСУП, ВСУТ, СПКР, СППЗ) и модуль имитатора акселерационных эффектов. Для уменьшения запаздывания к общей шине ВК 2 подключается модуль имитации визуальной обстановки. Здесь возможно создание тренажёра из функционально-законченных модулей: - пилотажного модуля (включает ВК 2, ВК 3, две стойки абонентских терминалов и соответствующее оборудование); - модуля бортинженера (включает ВК 4, стойку абонентских терминалов, приборы, органы управления, сигнализаторы силовой установки, бортовых систем контроля двигателей, топливной системы, системы регулирования давления, КИСС); - модуля самолётовождения (включает ВК 5, стойку абонентских терминалов, бортовое оборудование системы самолётовождения и радиотехнических систем; к общей шине ВК 5 подключается имитатор МНРЛС-85); - модуля инструктора (включает ВК 1, стойку абонентских терминалов, оборудование рабочего места инструктора).

Такое построение позволяет разрабатывать и специализированные тренажёры (естественно, с объёмом решаемых задач, меньшим, чем в комплексном АТ). Запаздывание от управляющего воздействия от штурвала до изменения изображения в имитаторе визуальной обстановки определяется запаздыванием собственно имитатора визуальной обстановки и 1-2 циклами решения задач.

Во втором варианте (связи показаны пунктирными линиями) контроллеры стоек абонентских терминалов подключаются не к интерфейсу "Общая шина" ВК1 - ВК5, а к магистрали МПД (подключается к одному из входов общего поля памяти ОЗУ). Здесь устройство комплексирования ОЗУ, кроме функций обмена данными между ВК1- ВК5, выполняет функции приёма и передачи данных от оборудования кабины и рабочего места инструктора. Это позволяет создать гибкую структуру вычислительной системы тренажёра, обеспечиваю-

щую перераспределение потоков информации (позволяет уменьшить количество коммутирующих средств). Эксплуатационная надёжность тренажёра во многом определяется надёжностью устройства комплексирования (отказ устройства приведёт к отказу тренажёра в целом).

С учётом изложенного выше очевидна целесообразность построения тренажёра по первому варианту, что практически и реализовано.

Ограничимся рассмотрением основных модулей.

Модуль имитатора динамики полёта. Структурная схема с указанием взаимосвязей с другими имитаторами приводится на рис. 2.

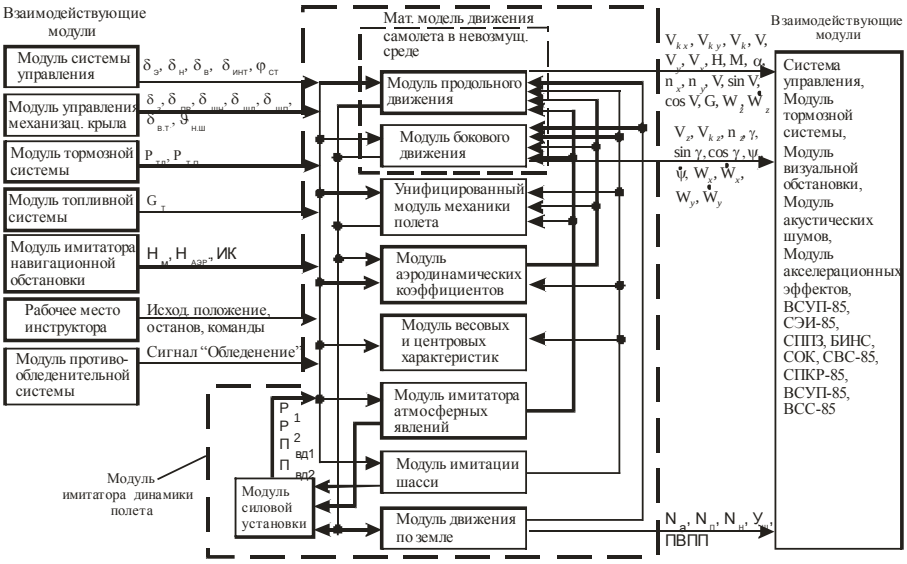


Рис. 2. Структурная схема модуля имитатора динамики полета

Приняты обозначения: ВСС-85 - вычислительная система самолетовождения, ВСУП-85 - вычислительная система управления полетом, ВСУТ-85 - вычислительная система управления тягой, СЭИ-85 - система электронной индикации, ИК - истинный курс, ПВПП- признак касания ВПП.

Остальные обозначения общепринятые.

Воспроизводится движение самолёта в пространстве (решение замкнутой системы нелинейных дифференциальных уравнений; входные параметры - управляющие воздействия экипажа, выходные - параметры полёта).

Моделируются [6]: - движение по ВПП и рулёжным дорожкам; - взлёт и набор высоты; - полёт по маршруту, снижение и заход на посадку; - уход на второй круг (с использованием средств комплекса стандартного пилотажно-навигационного оборудования); - экстренное снижение; - полёт по кругу, заход на посадку и посадка; - пробег по ВПП с использованием всех средств торможения; - полёт при опасных внешних воздействиях.

Учитываются: - температура воздуха и атмосферное давление; - высота (уровень местности) аэродрома; - горизонтальная составляющая скорости ветра; - сдвиг и порывы ветра (вертикальный и горизонтальный); - обледенение (изменение аэродинамических характеристик); - состояние ВПП; -сила тяжести и центровка самолёта; - режимы работы силовой установки (включая реверс); - положение управляющих поверхностей, механизация крыла, шасси (при движении по земле учитываются характеристики устойчивости и управляемости; коэффициенты увода и трения колёс с учетом состояния ВПП, торможения колёс и работы антиюзового устройства); - аэроупругость.

Для обеспечения подобия реального и моделируемого полёта самолёта осуществляется непрерывное вычисление параметров полёта в реальном масштабе времени. Экипажу с соответствующих модулей предоставляются визуальная, акустическая, акселерационная информации, показания приборов пилотажно-навигационного комплекса, положения и усилия на органах управления (формируемых в соответствии с параметрами, получаемыми в имитаторе динамики полёта (ИДП)).

Производится декомпозиция системы уравнений движения (продольное и боковое движения, движение по земле, модуль аэродинамических коэффициентов).

Шаг интегрирования задается из условий устойчивости и мощности ЭВМ.

Предусматривается возможность программного ввода и вывода значений физических параметров на дисплей.

Модуль имитатора системы управления. Структурная схема приводится на рис. 3.

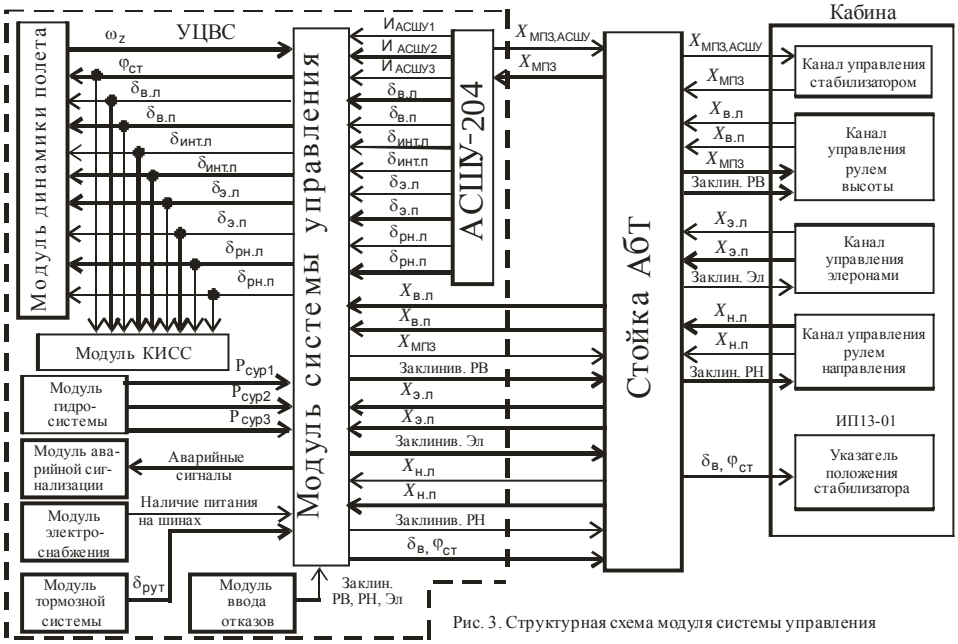


Рис. 3. Структурная схема модуля системы управления

Приняты обозначения: АбТ - абонентский терминал, $И_{АСШУ1}$, $И_{АСШУ2}$, $И_{АСШУ3}$ – индикация исправности каналов АСШУ, КИСС - комплексная информационная система сигнализации, РВ, РН, ЭЛ - рули высоты и направления; элерон, $Р_{СУР1}$, $Р_{СУР2}$, $Р_{СУР3}$, $Х_{МРЗ}$ - индикаторы давления в каналах гидросистемы и положения механизма регулирования загрузки.

Используется полунатурное моделирование на базе бортового оборудования. Обеспечивает имитацию работы каналов управления стабилизатором, рулём высоты, элеронами, интерцепторами, воздушными тормозами и рулём направления.

В модуле имитируются вероятные отказы реальной системы управления самолёта: - электрической системы балансировки канала управления стабилизатором; - электродистанционной системы регулирования диапазона подключения дополнительной загрузки колонок; - электродистанционных контуров управления СДУ; - в системах электро- и гидропитания, - заклинивание аварийных механических проводок.

В модуле имитатора проявляются отказы, имитируемые в имитаторах АСШУ-204 и ВСУП-85.

Модуль имитатора силовой установки. Структурная схема приводится на рис.4.

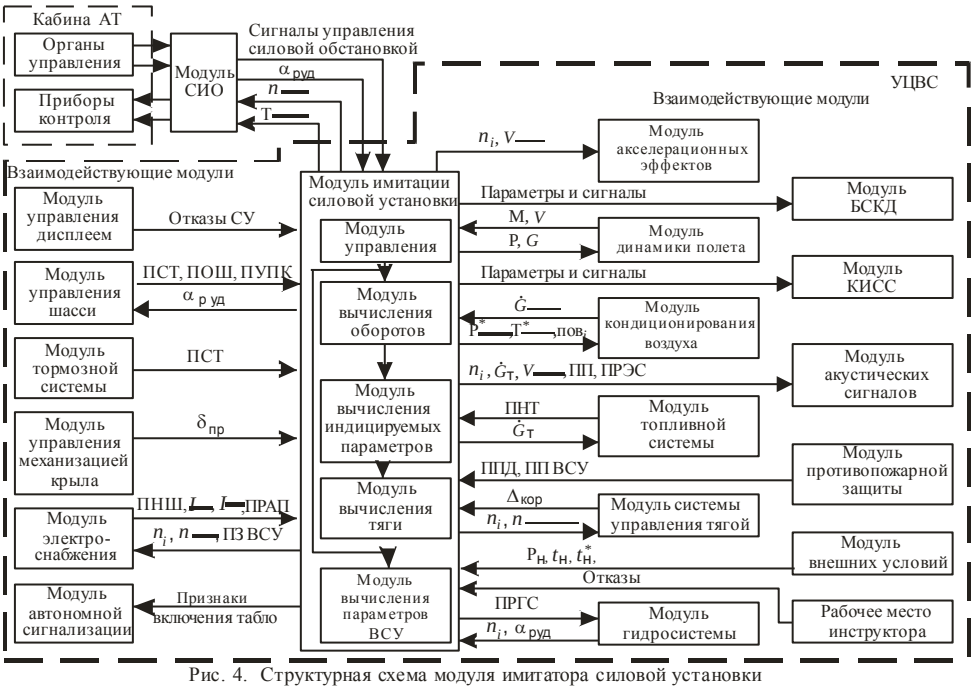


Рис. 4. Структурная схема модуля имитатора силовой установки

Приняты обозначения: ВСУ - вспомогательная силовая установка, ПЗ ВСУ,ПНТ, ПНШ, ПОШ, ПП, ПП ВСУ, ППД, ПРАП, ПРГС, ПРЭС, ПСТ, ПУПК, ППОМ, ПРЕВ - соответственно признаки запуска ВСУ, наличия напряжения на шинах, обжатия шасси, пожара, пожара ВСУ, пожара двигателя, подключения РАП, работы гидросистемы, работы электростартера, стояночного тормоза, управления передним колесом, помпажа и реверса.

Модуль обеспечивает воспроизведение работы: - двух маршевых двигателей ПС-90А, - вспомогательной силовой установки ВСУ ТА12-60, - системы контроля вспомогательной силовой установки СК-ВСУ, - системы автоматического регулирования САР-90, - автомата пуска двигателя АПД-ЗОТА-2, - электронного регулятора режимов работы вспомогательной силовой установки ЭРРД-12.

Имитация осуществляется на основе математического моделирования характеристик силовой установки в базовом вычислителе тренажёра с использованием блочно-модульной структуры программного обеспечения.

Связь базового вычислителя с органами управления и контроля в кабине осуществляется с использованием системы информационного обмена (связь с взаимодействующими модулями - внутримашинный и межмашинный обмен с информацией базового вычислителя).

Имитация работы вспомогательной силовой установки позволяет воспроизведение следующих режимов работы реальной системы: - предполётная проверка в кабине(включая комплекс АБ-14М); - подготовка к запуску двигателей; - холодная прокрутка двигателей; - запуск двигателей на земле от наземных и бортовых источников питания; - работа вспомогательной силовой установки на земле и в полёте в эксплуатационном диапазоне высот и скоростей; - останов двигателей на земле и в полёте; - запуск двигателей в воздухе (с блокировкой и без нее); - отбор мощности для режимов загрузки генератора $P_{ген}$=60кВА и отбор воздуха $\dot{G}_{в.отб}$ =0-2,5кГ/с; - имитация неудачного запуска силовой установки в диапазоне высот и скоростей, не оговоренных в «Руководстве по лётной эксплуатации» (повышение температуры газа выше 570°С, зависание оборотов двигателей $n_{всу} = (30 \pm 5)\%$, автоматическое прекращение запуска при включённой защите по предельным параметрам).

Обеспечивается воспроизведение следующих режимов работы маршевых двигателей: - подготовка двигателей к запуску; - проверка электронной части системы регулирования двигателя (РЭД) с использованием встроенного контроля; - холодная прокрутка двигателей; - ложный запуск и запуск двигателей на земле (от наземных и бортовых источников питания); - прогрев и опробование двигателей; - работа двигателей на установившихся и переходных режимах во всём эксплуатационном диапазоне скоростей (в диапазоне высот 0-13000 м); - нормальный и экстренный останов двигателей на земле и в полёте, а также останов пожарным краном; - авторотация; - реверс тяги; - управление в автоматическом режиме от системы ВСУТ-85; - имитация неудачного запуска двигателей в диапазоне высот и скоростей, не оговоренных в «Руководстве по лётной эксплуатации» (повышение температуры газа выше допустимой, зависание оборотов двигателя, автоматическое прекращение запуска при работоспособной системе регулирования двигателя, ускоренный запуск двигателей по сигналу с рабочего места инструктора).

Имитируются отказы: останов двигателя, помпаж двигателя, повышение температуры газов, отказ системы регулирования двигателя, вибрации двигателя, предельная температура газов вспомогательной силовой установки, разъединение управления двигателями, перегрев опоры, падение давления масла.

Метод моделирования позволяет обеспечить воспроизведение динамических характеристик в полном соответствии с "Нормами годности авиационных тренажеров для подготовки авиаперсонала воздушного транспорта".

Модуль имитатора акселерационных эффектов. Структурная схема приводится на рис.5.

Предназначается для воспроизведения составляющих акселерационного поля [1,6,7] информации, связанных с изменениями линейных перегрузок, угловых

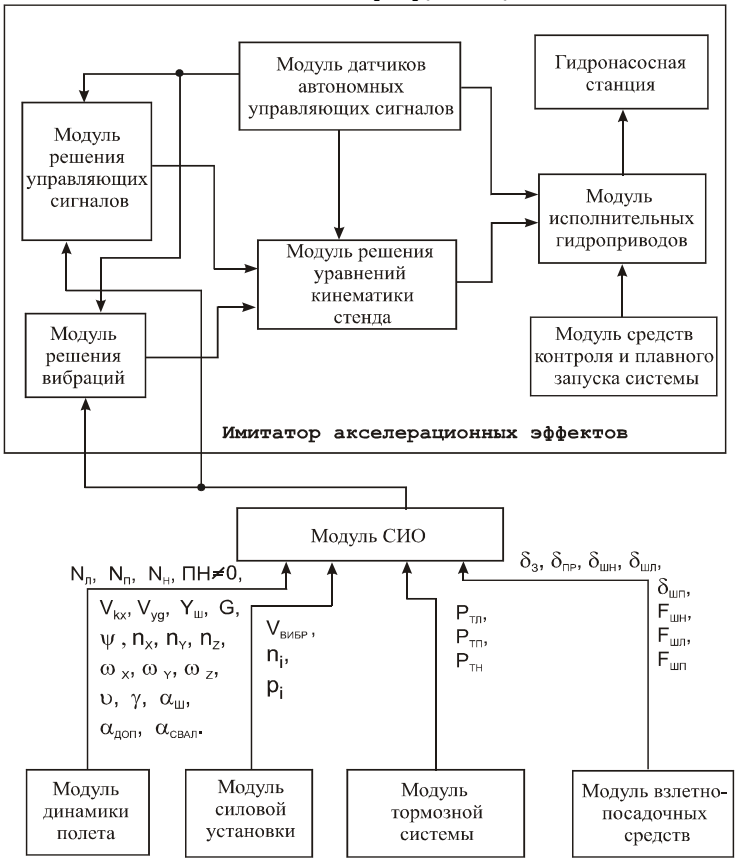


Рис. 5. Структурная схема модуля имитатора акселерационных эффектов ускорений и перемещений, характерных для различных режимов полёта, а также воспроизведения эффектов: - постоянного ненаправленного "фонового" движения в процессе всего полёта; - вибрации от работающих двигателей; - шумов от выпуска и уборки шасси; - обжатия стоек шасси при торможении, растормаживании, а также эффектов, вызванных их касанием ВПП, включая раздельное касание носовой, левой и правой стойками; - тряски при движении по ВПП; - сваливания.

Позволяет одновременно имитировать пространственное маневрирование и движение, вызванное внешним воздействием.

Разработка динамических стендов (включая системы управления ими) осуществляется на основе компромисса между возможно более точным моделированием (в наземных условиях) акселерационных ощущений лётчика и жесткими техническими ограничениями на максимальные линейные (в меньшей степени - на уг-

ловые) перемещения кабины стенда (во много раз меньшие реальных перемещений самолёта). Точное моделирование акселерационных ощущений лётчика во всём диапазоне частот принципиально невозможно - по линейным степеням свободы, а по угловым – затруднительно. Противоречие устраняется с использованием особенностей восприятия перегрузок лётчиком. В имитаторе акселерационных эффектов воспроизводятся частоты 0,3 - 3 Гц. Задаваемые перемещения определяются с учетом их допустимого диапазона (независимо от способа формирования управляющих сигналов).

Для того чтобы при моделировании низких частот в изменении перегрузки, кабина тренажёра не только не выходила за ограничения по перемещению, но и незаметно для лётчика стремилась вернуться в среднее, нейтральное положение, используются фильтры верхних частот. Воспроизведение на стенде длительно действующих линейных, боковых и продольных перегрузок (в диапазоне не более ±0,5g) обеспечивается возможностью наклона кабины на соответствующий угол. При разработке имитатора используются основы формирования ощущений наклонов у человека по реакциям отолитов, тактильных и кинестетических рецепторов. При разгоне и торможении самолёта результирующая массовых сил, действующая на рецепторы, вызывает ощущение наклона по тангажу. Кабина тренажёра наклоняется на соответствующий угол тангажа (линия горизонта на экране перед лётчиком не изменяет своего положения). Аналогично строится имитатор для боковых перегрузок.

При имитации длительно действующих перегрузок учитывается взаимное расположение отолитового аппарата (в районе головы лётчика) и центра вращения самолёта (отолиты воспринимают перегрузки от возникающих при вращении центробежных сил). Одновременно с вращением подвижной платформе задаются линейные перемещения.

Как в канале крена, так и тангажа используются фильтры.

Модуль включает динамический стенд с шестью степенями свободы (потребляемая мощность - 130кВА, количество заправляемого масла - 500л, грузоподъёмность - не более 5000кГ, высота - 2212мм, зона ограждения - 8х8м; см. также табл 1.) стойку управления, микропроцессорные вычислители, гидронасосную станцию.

Таблица 1.Рабочие характеристики динамического стенда

Параметр движения	Диапазон перемещения	Максимальная скорость	Максимальное ускорение
Продольное (X)	± 0,6 м	± 0,8 м/с	± 8 м/с^2
Вертикальное (У)	± 0,5 м	+0,7 ÷ 0,8 м/с	± 8 м/с^2
Боковое (Z)	± 0,6 м	± 0,8 м/с	+-8м/с^2
Крен (γ)	± 24 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2
'Гангаж (ϑ)	± 21 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2
Рыскание (ψ)	± 23 град	± 20 град/с	± 100 град/с^2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1.Рассматриваются методологические принципы создания авиационных тренажеров модульной архитектуры с использованием системного подхода.

2.Приводятся структура, состав, а также указываются взаимосвязи информационно-вычислительных систем тренажеров, предусматривающих распараллеливание вычислительных процессов.

3.Предлагаются варианты модульного построения тренажеров с разработкой основных модулей.

4.Результаты исследований использованы при разработке динамических стендов и комплексных тренажеров самолетов Ил-76МД, Ил-96-300, Ту-204, Ан-72, Ан-74 и др., широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.

5.Приведенные принципы разработки авиационных тренажеров могут использоваться при проектировании и других управляемых в пространстве динамических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1.А.М.Данилов, А.Н Анисимов, И.А.Гарькина, Б.В.Клюев, Э.В.Лапшин. Методологические принципы проектирования сложных управляемых в пространстве динамических систем в приложении к разработке авиационных тренажеров. // III Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления SICPRO` 04». Москва, 28-30 января 2004, ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова. С.279-311

2. А.М.Данилов, Л.З.Дулькин, А.С.Земляков, В.М.Матросов. В.А.Стрежнев. Динамика стратосферной обсерватории. Труды V Международного симпозиума ИФАК по управлению в пространстве. Италия, Генуя. В 2 томах. Т.1. Управление в пространстве. – М.: Наука, 1975. С.208-228.

3. А.М.Данилов, Л.З.Дулькин, А.С.Земляков, В.М.Матросов. В.А.Стрежнев. Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями. Труды VI Международного симпозиума ИФАК по управлению в пространстве. Г.Цахкадзор. В 2 томах. Т.1. Управление в пространстве. – М.: Наука, 1976. С.153-171.

4. А.М.Данилов, В.А.Лапин, Э.В.Лапшин, В.Н.Шихалеев. Модульная архитектура пилотажных авиационных тренажеров на базе ПЭВМ. III Всесоюзная научно-техническая конференция «Тренажеры и компьютеризация профессиональной подготовки». – Калининград, 1991.

5. А.М.Данилов, А.П.Прошин, И.А.Гарькина. Системная методология идентификации сложных динамических систем. Аэрокосмические приложения./ Сборник материалов Ш Международного симпозиума «Аэрокосмические приборные технологии». С.Петербург, 2-4 июня 2004 г.

6. А.М.Данилов, Э.В,Лапшин. Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров / «Приборы и системы управления», №8, 1989.

7. Безбогов А.А. Современные авиационные тренажеры. Часть 3. Моделирование акселерационной обстановки /А.А. Безбогов, Л.М. Дубовый, П.П. Зобков //Издание РВВАИУ им. Я. Алксниса (629.7.01.С56) – Рига, 1988. С. 65-76.