

Н. А. БОГАЧЕВА, А. Д. ЖУКОВ, С. А. ЖУКОВ

ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АНТИЮЗОВОЙ АВТОМАТИКИ САМОЛЕТА

Рассматриваются вопросы, связанные с созданием полунатурного стенда, имитирующего пространственное наземное движение самолета. Приводятся функциональные схемы малого контура управления — системы антиюзовой автоматики и большого контура управления — самолета в целом. Учтены все основные силы и моменты, действующие на него при посадке (прерванном взлете).

Ключевые слова: математическое моделирование, полунатурное моделирование, самолет, посадка, антиюзовая автоматика, система дистанционного управления давлением.

Вопросам имитации динамики полета для освоения навыков пилотирования самолетов внимание уделялось уже на заре авиации. По мере усложнения самолетов, повышения их летно-технических характеристик компьютерное моделирование динамики полета, авиационное тренажеростроение и строительство исследовательских моделирующих стендов стали приоритетными направлениями технического прогресса в авиации. С 1980-х гг. более 100 зарубежных фирм, включая крупнейшие самолетостроительные концерны, заняты этими вопросами [1]. Разработкой авиационных тренажеров и моделирующих стендов занимаются и многие российские ученые [2—5].

Авторы настоящей статьи много лет посвятили вопросам проектирования и разработки самолетных систем антиюзовой автоматики (САА), являющихся неотъемлемой частью системы колесного торможения любого самолета. Рассматриваемый полунатурный стенд NiBiuM³ является развитием цифровой модели посадки [6] и предназначен для проведения испытаний и настройки САА в контуре управления. Он может быть достаточно легко интегрирован в различные тренажеры и исследовательские моделирующие стенды для достоверного представления динамики работы самолетной колесной тормозной системы при движении самолета по земле.

Динамика качения колес самолета с учетом влияния на них объекта управления (самолета в целом), а также геометрические и фрикционные неровности взлетно-посадочной полосы (ВПП) моделируются на персональном компьютере.

В рассматриваемом полунатурном стенде большой контур управления (БКУ), описывающий динамику пространственного движения самолета при послепосадочном пробеге (прерванном взлете) практически весь реализован программно, с использованием MatLab/Simulink [7]. Аппаратно обеспечивается только управление самолетом с помощью штурвала и педалей. Наибольшее внимание при создании стенда уделено аппаратно-программной реализации малых контуров управления (МКУ). Аппаратно реализованы: четырехканальный микропроцессорный регулятор, система дистанционного управления давлением (СДУД), гидравлические части тормозов. Программно реализованы силовые части колесных тормозов, колеса с колесными датчиками угловой скорости, геометрические и фрикционные неровности ВПП.

Функциональная схема тормозной системы. Функциональная схема САА приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: МКУ₁—МКУ₄ — малые контуры управления, каждый из которых содержит электронный регулятор, формирующий электрический сигнал управления; систему дистанционного управления давлением, преобразующую этот сигнал в тормозное давление; тормоз, создающий тормозной момент и тормозное колесо, яв-

ляющееся объектом управления малого контура. На функциональной схеме обозначены следующие фазовые координаты: $U_{\text{л}}$ — сигнал от датчиков тормозного давления; $U_{\text{у}}$ — сигнал управления с регулятора; $U_{\text{ос}}$ — сигнал внутренней обратной связи по давлению; $P_{\text{т}}$ — тормозное давление на выходе СДУД; $M_{\text{т}}$ — тормозной момент в тормозе колеса; $\omega_{\text{к}}$ — угловая скорость тормозного колеса; $\mathbf{x}_{\text{ВПП}}$ — вектор геометрических и фрикционных неровностей ВПП; $\mathbf{F}_{\text{к1}}—\mathbf{F}_{\text{к4}}$ — векторы сил и моментов, действующих на корпус планера от колес; $\mathbf{x}_{\text{ООШ1}}—\mathbf{x}_{\text{ООШ2}}$ — векторы геометрических координат осей тормозных колес.

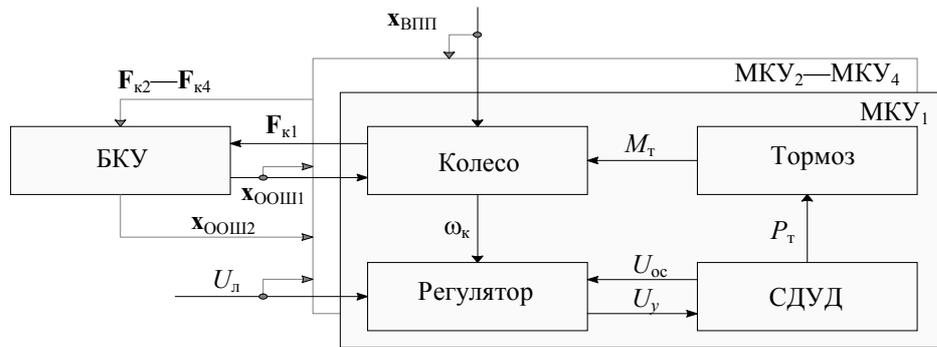


Рис. 1

Регулятор представляет собой микропроцессорное устройство, которое в зависимости от значения угловой скорости тормозного колеса $\omega_{\text{к}}$ и сигналов от датчика тормозного давления $U_{\text{л}}$ и внутренней обратной связи по давлению $U_{\text{ос}}$ формирует сигнал управления $U_{\text{у}}$. Он через интерфейсное устройство подключается к персональному компьютеру.

СДУД стенда — гидравлическая. При полунатурном моделировании целесообразно натурное исполнение гидравлической системы, поскольку такие системы часто имеют явно выраженные колебательные свойства, существенно меняющиеся под действием многих факторов, и прежде всего температуры в рабочем диапазоне от -55 до $+40$ °С.

Тормоз в натурной части стенда представляет собой замкнутый подпружиненный объем с датчиком тормозного давления. Нелинейная зависимость тормозного момента $M_{\text{т}}$ от тормозного давления $P_{\text{т}}$, снятого с датчика тормозного давления, моделируется в программной части стенда.

Колесо в стенде реализовано программно. Эквивалентная схема тормозного колеса с упругой пневматической шиной в полунатурном стенде представляет собой два концентрических кольца, которые вращаются и закручиваются друг относительно друга: внутреннее кольцо, с моментом инерции J_{w} , жестко связанное с ободом колеса, и внешнее кольцо с моментом инерции J_{pn} , связанное с первым посредством пружины с жесткостью C_{wt} и демпфера с коэффициентом демпфирования K_{wt} . Его динамика может быть описана системой дифференциальных уравнений 3-го порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\varphi_w}{dt^2} &= \frac{J_w + J_{pn}}{J_w J_{pn}} \left[C_{wt}\varphi_w + K_{wt} \frac{d\varphi_w}{dt} \right] + \frac{1}{J_{pn}} [F_n + F_d] r_{dn} [\mu_s + \varphi_w] + \frac{1}{J_w} M_b, \\ \frac{d\omega_w}{dt} &= \frac{1}{J_w} \left[C_{wt}\varphi_w + K_{wt} \frac{d\varphi_w}{dt} - M_b \right]. \end{aligned} \right\}$$

Здесь φ_w — угол закручивания внешней части пневматической шины относительно центральной; ω_w — угловая скорость центральной части пневматической шины и вращающего-

ся обода колеса; J_w — момент инерции центральной части пневматической шины вместе с ободом и тормозом; J_{pn} — момент инерции внешней части пневматической шины; $C_{вт}$ — тангенциальная жесткость пневматической шины; $K_{вт}$ — коэффициент демпфирования пневматической шины в тангенциальном направлении; F_n — нормальная реакция пневматической шины; F_d — компонент демпфирования пневматической реакции шины на сжатие; r_{dn} — динамический радиус пневматической шины; μ_s — коэффициент скольжения в функции скольжения шины; f_w — коэффициент трения качения, который зависит от скорости и нагрузки колеса; M_b — тормозной момент колеса.

Функциональная схема большого контура управления. Под БКУ в данном случае понимается математическая модель пространственного движения самолета по земле, в которой учтены все основные силы и моменты, действующие на самолет при его наземном движении.

Функциональная схема БКУ представлена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: НОШ — носовая опора шасси; ООШ₁, ООШ₂ — основные опоры шасси; $x_{пл}$ — вектор геометрических координат планера в самолетной системе координат (ССК); $x_{ООШ1}$, $x_{ООШ2}$ — вектор геометрических координат основных опор шасси в ССК; $F_{к1}$ — $F_{к4}$ — векторы сил и моментов, действующих на ООШ₁ и ООШ₂ соответственно со стороны тормозных колес; $F_{ООШ1}$, $F_{ООШ2}$ — векторы сил и моментов, действующих на самолет соответственно со стороны ООШ₁ и ООШ₂; $F_{НОШ}$ — вектор сил и моментов, действующих на самолет со стороны НОШ; F_a — вектор аэродинамических сил и моментов, действующих на самолет; F_d — вектор сил и моментов, действующих на самолет со стороны авиадвигателей.

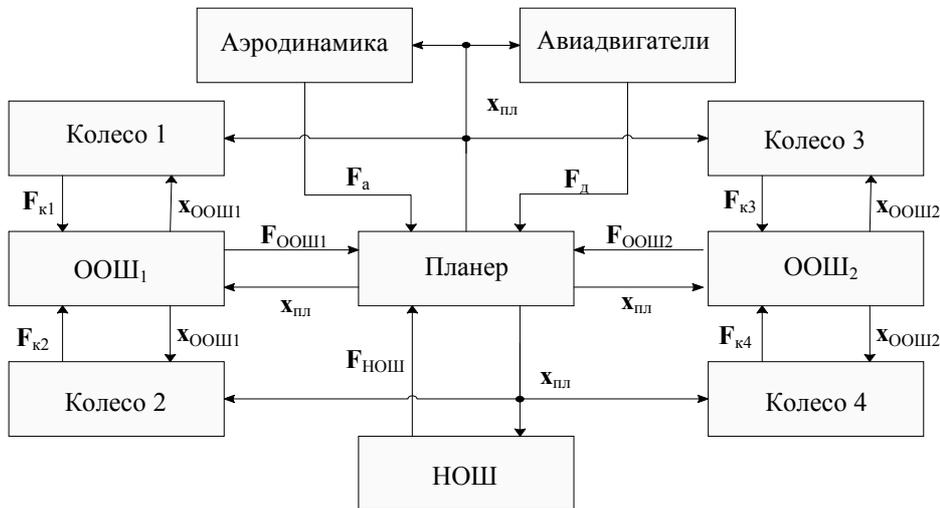


Рис. 2

В математических моделях элементов БКУ учтены их основные динамические свойства, для опор шасси это — амортизационные и демпфирующие характеристики, для аэродинамики — использование средств механизации крыла, для авиадвигателей — их скоростные, высотные и переходные характеристики.

Рассмотренный полунатурный стенд обеспечивает возможность проверить работоспособность и эффективность САА при различных алгоритмах торможения в условиях посадки (прерванного взлета) на ВПП с малым коэффициентом трения. Он моделирует работу САА и других бортовых систем самолета, а также обеспечивает возможность регистрации и статистической обработки параметров при испытании САА в различных условиях эксплуатации, в

том числе редких и крайне опасных. Особенно следует подчеркнуть возможность имитации отказных и аварийных режимов, таких как отказ тормозной системы, поломка авиадвигателя, невыпуск средств механизации крыла, заклинивание руля направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Установки для моделирования боевых действий самолетов и эффективность их применения (по материалам открытой иностранной печати): Обзор. М.: ЦАГИ, 1986. № 688.
2. Боднер В. А., Закиров Р. А., Смирнов И. И. Авиационные тренажеры. М.: Машиностроение, 1978.
3. Тренажерные системы / Под ред. В. Е. Шукинуова. М.: Машиностроение, 1981.
4. Красовский А. А., Лопатин В. И., Наумов А. И., Самолаев Ю. Н. Авиационные тренажеры. М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1992.
5. Красовский А. А. Основы теории авиационных тренажеров. М.: Машиностроение, 1995.
6. Богачева Н. А., Жуков А. Д. Цифровая модель послепосадочного торможения самолета (NiBiuM++). Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610482. М.: Роспатент, 2002.
7. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании: Полное руководство пользователя. М.: Солон-Р, 2002.
8. Богачева Н. А., Жуков А. Д. Алгоритм управления торможением самолета на пробеге // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. Приложение. С. 6—9.

Сведения об авторах

- Надежда Анатольевна Богачева** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; ведущий программист; E-mail: az@aanet.ru
- Алексей Дмитриевич Жуков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: az@aanet.ru
- Сергей Алексеевич Жуков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: az@aanet.ru

Рекомендована ГУАП

Поступила в редакцию
04.04.11 г.