

**НАПРАВЛЕНИЕ**  
**«СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**  
**И ТОПЛИВОПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ» /**  
**«ENGINE CONTROL AND FUEL SYSTEMS FOR FLYING VEHICLES»**

УДК 629.7.035.3:004.942

**МОДЕЛЬ САМОЛЕТА С ПОРШНЕВОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ: ПЕРВЫЙ**  
**ЭТАП ИНТЕГРАЦИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПАКЕТ ALLBEA**

Черноусов А.А., Кургузов И.В.

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, [andrei.chernousov@mail.ru](mailto:andrei.chernousov@mail.ru)

*Ключевые слова:* динамика самолета, поршневые двигатели, численное моделирование, алгоритмы управления, ALLBEA

Современные требования к проектированию авиационных систем предполагают интеграцию в инженерное ПО не только моделей динамики ЛА, но и алгоритмов управления силовыми установками (СУ). В рамках развития пакета ALLBEA [1] для мульти-физического моделирования и синтеза технических систем реализована базовая модель динамики самолета с поршневой СУ. Было необходимо заложить основу для последующего внедрения алгоритмов автоматического регулирования параметров двигателя (оборотов, топливоподачи, шага винта) в единую вычислительную платформу.

Данная работа представляет стартовый этап разработки программного инструмента промышленного уровня для совместного анализа динамики и систем управления. Несмотря на упрощения, текущая модель готова к сопряжению и с более сложными моделями работы СУ, и с алгоритмами для моделирования в ALLBEA регуляторов и целых систем управления.

Модель горизонтального полета – система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), учитывающая аэродинамическое сопротивление, тягу винта, крутящий момент и расход топлива авиационного поршневого двигателя (АПД) в составе СУ:

$$\frac{d(mv_x)}{dt} = (P_a)_x + (P_T)_x, \quad \frac{dx}{dt} = v_x, \quad \frac{dm}{dt} = -G_{\text{топл}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса самолета,  $v_x$  – горизонтальная скорость,  $(P_a)_x$  – сила аэродинамического сопротивления,  $(P_T)_x$  – сила тяги воздушного винта,  $G_{\text{топл}}$  – расход топлива.

Сила сопротивления определяется как  $(P_a)_x = -C_x \rho_0 v_x^2 S / 2$ , где  $C_x$  – коэффициент сопротивления,  $\rho_0$  – плотность воздуха, зависящая от высоты  $H$ , а  $S$  – площадь крыла.

Сила тяги винта:  $(P_T)_x = C_T \rho_0 f_b^2 D^4$ , где  $C_T$  – коэффициент тяги,  $f_b = n_b / 60$  – частота вращения винта (об/с),  $D$  – диаметр винта.

Расход топлива:  $G_{\text{топл}} = N_e / (\eta_e H_u)$ , где  $N_e = P / \eta_p$  – эффективная мощность двигателя, определяемая с учетом механического КПД редуктора  $\eta_p$  и мощности на привод винта:  $P = C_p \rho_0 f_b^3 D^5$ , где  $C_p$  – коэффициент мощности.

Режим работы АПД определяет  $n = n_b / i_p$  – частота вращения коленчатого вала, а также (в более развитых моделях СУ) подача воздуха и/или топлива. Здесь модель СУ предельно проста: текущая располагаемая мощность АПД считается равной потребной мощности. Данное допущение исключает динамику, термо- и газодинамику АПД, упрощая описание переходного процесса, но допустимо лишь в базовой реализации модели и ее тесте.

Реализация тестировалась на задаче о Як-18Т в горизонтальном полете. Начальная скорость  $(v_x)_0 = 144$  км/ч задана менее равновесной  $(v_x)_\infty = 180$  км/ч. Прочие параметры задачи:

- начальная масса:  $m_0 = 1510$  кг [2];
- плотность воздуха  $\rho_0 = 1,11164$  кг/м<sup>3</sup> (по [3] для  $H = 1$  км);

- диаметр винта  $D = 2,4$  м [2], площадь крыла  $S = 18,8$  м<sup>2</sup>;
- передача: степень редукции  $i_p = 0,658$  [4], КПД  $\eta_p = 0,95$ ;
- двигатель на крейсерском режиме (принятом в качестве опорного):  $n = 1860$  об/мин,  $g_e = 230$  г/кВт/ч [4] и  $N_e = 115$  кВт; коэффициент сопротивления для этих условий:  $C_x = 0,0575$  [5].

Модель реализована в модуле на языке С, в котором система (1) решается численно явным двухстадийным методом Рунге – Кутты (РК-2). Разработан также модуль, автоматизирующий тест модели. Тест численно решает приведенную выше задачу динамики горизонтального полета. В тесте описываемой базовой модели вычисленные по параметрам опорного режима и замыкающим правые части (1) уравнениям безразмерные величины  $C_x$ , а также  $C_T = 0,097881$ ,  $C_p = 0,145425$  и  $\eta_e = 0,35630$  подставляются в расчет как константы.

Для упрощения анализа в одном из расчетов расход топлива был отключен:  $G_{\text{топли}} = 0$ . Для этого частного случая модели численное решение  $v_x^n$  асимптотически стремится к  $(v_x)_\infty$ ; оценено отклонение численного решения от точного в зависимости от расчетного шага: разность  $v_x^N - v_x(t^N)$  при дроблении шага от  $\Delta t_1 = 2$  с до  $\Delta t_2 = 1$  с уменьшилась с высокой точностью в 4 раза, что соответствует порядку метода РК-2 и подтверждает корректность реализации модуля.

Расчет процесса в течение 120 с при  $G_{\text{топли}} > 0$  и с шагом в 2 с дал решение на рис. 1.

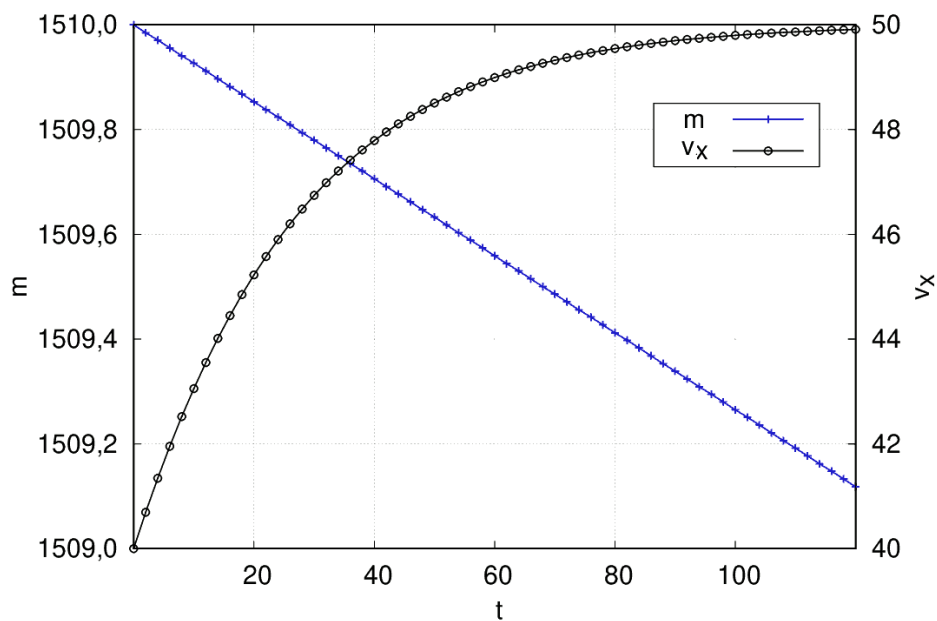


Рис. 1 – Масса самолета  $m^n$  и его скорость  $v_x^n$  (численное решение)

Таким образом, модель самолета с поршневой силовой установкой и воздушным винтом проверена на задаче о горизонтальном полете Як-18Т.

Реализованная модель самолета с поршневой силовой установкой представляет первый этап создания в ALLBEA модулей для совместного анализа динамики транспортных систем, работы их силовых установок и алгоритмов управления сложными объектами. Модель уже применяется для демонстрации принципов сопряжения динамики ЛА и управления СУ. Выданы задания на разработку («через тестирование») модулей, реализующих подмодели «СУ», «Винт» и «Окружающая среда».

Следующий этап – реализация в ALLBEA библиотеки алгоритмов управления для анализа и синтеза оптимальных систем управления. Ключевые направления развития:

1. Интеграция моделей датчиков и регуляторов (например, ПИД-контроллеров для управления оборотами двигателя и шагом винта).
2. Модернизация вычислительных методов (внедрение неявных решателей для жестких систем ОДУ, типичных для мультифизических моделей).
3. Верификация и отработка пакета ALLBEA на промышленных кейсах (анализ переходных процессов в авиационных и наземных системах).

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

### **Список литературы**

1. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Пакет прикладных программ ALLBEA для моделирования и оптимизации процессов энергетических установок // Двигателестроение. Общие проблемы двигателестроения. 2023. № 4 (294). С. 3–15.
2. Руководство по летной эксплуатации самолета Як-18Т с двигателем М-14П ФЛА России. М.: Федерация любителей авиации России, 2001. 46 с.
3. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Стандартинформ, 2004. 180 с.
4. Лапшин А.М., Анохин П.И. Авиационный двигатель М-14П. М.: Транспорт, 1976. 229 с.
5. Практическая аэродинамика самолета Як-18Т 36 серии / Бехтир В.П. [и др.]. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2010. 91 с.

### **Сведения об авторах**

Черноусов А.А., доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания УУНиТ. Область научных интересов: численное моделирование и оптимизация двигателей и силовых установок.

Кургузов И.В., студент УУНиТ. Область интересов: динамика наземных и воздушных транспортных средств.

## **AIRCRAFT MODEL WITH PISTON POWERPLANT: FIRST STAGE OF CONTROL ALGORITHMS INTEGRATION INTO ALLBEA PACKAGE**

Chernousov A.A., Kurguzov I.V.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, [andrei.chernousov@mail.ru](mailto:andrei.chernousov@mail.ru)

*Keywords: aircraft dynamics, piston engine, control algorithms, numerical modeling, ALLBEA*

A modular mathematical model of an aircraft with piston powerplant has been developed for the ALLBEA multiphysics simulation package. The model, implemented as a system of ordinary differential equations, serves as the foundation for subsequent integration of engine control algorithms (RPM, fuel supply, propeller pitch). The solution was verified using Yak-18T aircraft dynamics in horizontal flight. Current implementation demonstrates readiness for: 1) coupling with advanced powerplant models, 2) control system integration, and 3) industrial applications analysis.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignments № FEUE-2023-0007.