

Комплексная модель исследовательского пилотажного стенда вертолета с бесшарнирным несущим винтом

**О.А. ЛЕДЯНКИНА,
С.А. МИХАЙЛОВ,**
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
OALedyankina@kai.ru

Представлена комплексная модель пилотажного стенда, предназначенного для проведения исследовательских испытаний имитационной модели динамики полета вертолета с бесшарнирным несущим винтом. Представлена структурная схема, состав и каналы функционирования программного обеспечения пилотажного стенда. Оценена возможность применения запаздывания управления.

Пилотажный стенд, вертолет, имитационная модель, динамика полета, запаздывание управления

Важную роль при подготовке пилотов играют авиатренажеры. Во избежание привития ложных навыков математическая модель динамики полета летательного аппарата, реализованная в программном обеспечении вычислительного комплекса тренажера, должна быть адекватной. Одним из важнейших этапов разработки таких моделей являются исследовательские испытания, не только оценивающие диапазоны применимости, но и позволяющие довести модель динамики до натурных характеристик имитируемого летательного аппарата. Особенно это актуально для вертолетов, оснащенных бесшарнирным несущим винтом. Маневренные характеристики такого вертолета, обусловленные реакцией бесшарнирного винта на движение ручки циклического шага, требуют проведения ряда исследований. При этом моделирование переходных и маневренных режимов полета вертолета наиболее целесообразно проводить на пилотажном стенде, поскольку наличие летчика-оператора в цепи управления является важным фактором при исследовании динамики вертолета в реальном масштабе времени [1].

Задачей настоящей работы является разработка экспериментального образца пилотажного стенда с целью проведения исследований по доводке имитационной модели динамики полета вертолета с бесшарнирным несущим винтом до характеристик моделируемого прототипа.

Предлагается комплексная модель исследовательского пилотажного стенда, функционирующая по двум параллельным процессам взаимодействия пилота и оператора с программным обеспечением стенда. Данную модель можно представить в виде структурной схемы (рис. 1).



Рис. 1

Первый канал формирует взаимосвязь пилота и пилотажного стенда. Движения ручек управления оцифровываются, и численные значения передаются в модель динамики полета. Для полно-

ценного функционирования данного канала необходимо взаимодействие пилота и органов управления.

Управление, осуществляемое с помощью авиационных джойстиков, в значительной мере искажает действительность. Ходы и усилия при движении ручек и педалей управления авиационных джойстиков не соответствуют в полной мере управлению реальным вертолетом, поэтому в данном стенде используются реальные органы управления вертолетом. При помощи электромеханической системы передачи сигналов управляющие воздействия, формируемые пилотом стенда, в оцифрованном виде реализуются в математической модели динамики полета вертолета.

При решении задачи динамики полета вертолета используется система уравнений полного пространственного движения вертолета [2] в трехмерном евклидовом пространстве. Эффективный метод численного решения применен в работах [3, 4]. Для решения уравнений динамики полета на рассматриваемом интервале времени необходимо знать значения сил и моментов, создаваемых основными агрегатами вертолета. Вычисление нагружения вертолета осуществлено при помощи имитационных моделей [5], созданных на основе алгоритмов искусственных нейронных сетей. Эта задача решена в квазистатической постановке, но с учетом всех необходимых параметров движения вертолета, оказывающих влияние на силы и моменты винтов. Решение проблемы моделирования особых случаев проводится с применением коррекционных моделей (вихревого кольца, интерференции винтов, влияния близости земли), позволяющих изменять нагружение винтов в соответствии с характеристиками таких режимов.

Любая математическая модель имеет некоторую погрешность по отношению к моделируемому объекту, в связи с чем предусмотрен комплекс линейных регулировочных коэффициентов, позволяющих снизить погрешность имитирования. В частности, рассмотрим вопрос запаздывания управления вертолетом, обусловленный тем, что в данной модели переходные процессы движения лопастей винта не учитываются.

Исследуются два способа расчета. С помощью первого способа моделируется движение лопастей несущего винта по времени в комплексе с динамикой полета вертолета (рис. 2–4). При втором способе (см. рис. 2–4) в каждый момент времени упругомаховое движение лопастей, силы и моменты несущего винта соответствуют их мгновенным значениям (квазистатическая постановка).

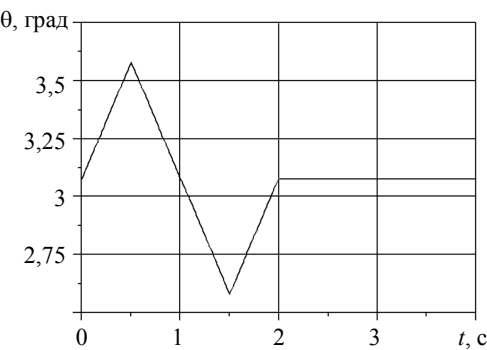


Рис. 2

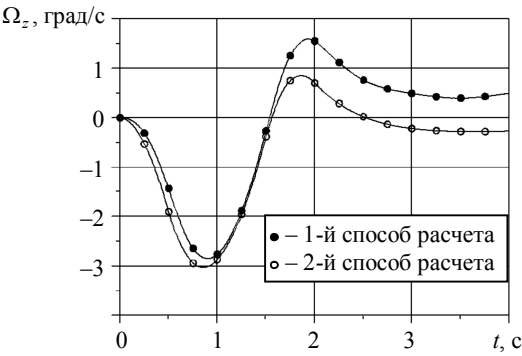


Рис. 3

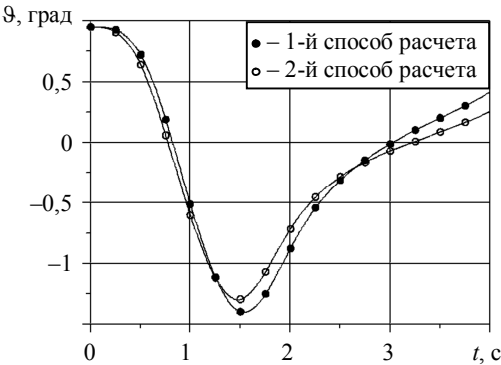


Рис. 4

Импульс управления по продольному циклическому шагу θ_1 одинаков для обоих способов (см. рис. 2). Начальная точка – балансировка на режиме горизонтального полета со скоростью 150 км/ч. Расчеты траекторий движения вертолета выполняются в течение 4 с.

Как показывают результаты расчетов, решение уравнений динамики без учета движения лопастей приводит к запаздыванию по угловым скоростям движения вертолета (см. рис. 3). Очевидно, что с течением времени такая картина изменения угловых скоростей вызовет существенное расхождение в величинах и характере распределения угла тангажа по времени. В связи с этим была выполнена попытка найти для второго способа такое управление по θ_1 , чтобы получить близкую к первому способу расчета траекторию движения. Такое эквивалентное управление было подобрано. Первый импульс по θ_1 уменьшили с 0,5 до 0,46°, а второй увеличили с 0,5 до 0,54°. В этом случае получена зависимость угла тангажа по времени, достаточно соответствующая первому способу (см. рис. 4).

Следовательно, можно подобрать линейные коэффициенты запаздывания управления, которые позволяют использовать методику расчета с мгновенными характеристиками винта. В связи с этим в функциональную схему стенда введен модуль запаздывания управления. Такого же рода модули запаздывания по управлению несущим винтом применяются и за рубежом [6] в Simona Research Simulator (исследовательский симулятор).

Таким образом, выполнив учет необходимых факторов, при выходе из модуля динамики полета стенда получаем новое положение вертолета в пространстве в текущий момент времени. Эти данные передаются в систему визуализации окружающего пространства.

С развитием компьютерной графики и увеличением мощности аппаратного обеспечения стало возможным использование более сложных программных моделей различных природных и искусственных явлений и объектов. Однако методы, используемые в системах визуализации наземных систем, не слишком подходят для работы с большим количеством видимых объектов, присутствующих в системе визуализации пилотажного стенда, поэтому была выбрана модель визуализации окружающего пространства [7]. Преимуществом данной системы является использование высокодетализированных высотных карт при минимальных вычислительных затратах.

Таким образом, система визуализации, получив данные о положении вертолета, устанавливает камеры просмотра в нужное положение, имитируя полет в пространстве. Визуально данная картина отображается на главном мониторе стенда, фактически формируя обратную связь с пилотом стенда. Следует отметить, что обратная связь состоит не только из визуальных образов окружающей местности, но и показаний группы минимально необходимых пилотажно-навигационных приборов.

Пилот в реальном полете ориентируется не только на визуальную обстановку, но и на показания комплекса навигационно-пилотажных приборов. Задача имитации приборной панели вертолета решена при помощи технологии Macromedia Flash, которая позволяет выполнить визуальное имитирование работы пилотажно-навигационных приборов вертолета на вспомогательном мониторе пилотажного стенда.

Таким образом, с использованием визуальных образов окружающего пространства и показаний пилотажно-навигационных приборов сформирована обратная связь с пилотом стенда.

Второй канал – канал системы управления. Система управления стендом предназначена для выполнения двух функций. Первая – это формирование точки старта программы имитации динамики полета вертолета с бесшарнирным несущим винтом. Под точкой старта подразумевается комплекс конструктивных параметров и условий, определяющих динамику и кинематику, а также положение вертолета в пространстве в начальный момент времени.

Таковыми точками старта на земле может быть: 1) стоянка на земле с выключенными двигателями (с ветром и без) и на различных барометрических высотах; 2) стоянка на земле с включенными двигателями и вращающимися винтами (с ветром и без) и на различных барометрических высотах.

Точками старта в воздухе могут быть установившиеся режимы полета:

- 1) горизонтальный полет на различных скоростях и высотах;
- 2) виражи на различных скоростях и высотах полета;
- 3) набор или снижение высоты с постоянной скоростью в различных условиях.

В этом случае могут варьироваться центровка, массовые характеристики вертолета (взлетный вес, моменты инерции), уровень заправки вертолета.

Вторая функция – изменение условий полета или введение отказов различных систем.

Конструктивная схема исследовательского пилотажного стенда представлена на рис. 5. Здесь: 1 – персональный компьютер; 2 – монитор системы визуализации; 3 – монитор имитации приборной панели; 4 – рама крепления; 5 – ручка циклического шага; 6 – ручка общего шага; 7 – ручки управления двигателями; 8 – педали шага рулевого винта; 9 – тормоз несущего винта; 10 – кресло пилота; 11 – аудиокolonки. Основная часть стенда – рамная конструкция с закрепленными на ней органами управления вертолетом и креслом пилота. Ручки управления циклическим шагом и педали снабжены пружинными механизмами загрузки, создающими обратные усилия на органах управления, пропорциональные их перемещениям. В управлении общим шагом для фиксирования ручки в заданном положении применен фрикционный тормоз.

Для отображения рельефа местности предусмотрен монитор системы визуализации. В данном стенде применен OLED-монитор с вогнутым экраном. Согласно различным тестам некоторые виды информации на вогнутом экране воспринимаются лучше, нежели на плоском. В авиационных симуляторах изогнутый экран создает реальное ощущение глубины и больше соответствует сенсомоторным реакциям человека.

Для имитации приборной панели применяется дополнительный, но уже плоский монитор. Расположенные рядом с главным монитором аудиокolonки позволяют симулировать шум винтов вертолета, что усилит эффект присутствия.

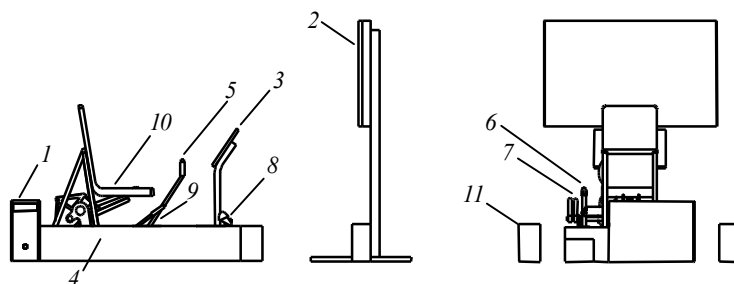


Рис. 5

Таким образом, разработана комплексная модель пилотажного стенда вертолета с бесшарнирным несущим винтом. Применение инновационных моделей имитации динамики полета вертолета и визуализации окружающего пространства обеспечили возможность функционирования стенда в режиме реального времени на типовом персональном компьютере.

Созданный на основе предложенной модели пилотажный стенд позволит провести исследовательские испытания имитационной модели динамики полета вертолета на переходных и маневренных режимах полета вертолета.

Прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований – RFMEFI57414X0105.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивчин В.А. Современная математическая модель для исследования динамики вертолета на пилотажных стендах // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 125. С. 54–63.
2. Браверман А.С., Вайнтруб А.П. Динамика вертолета. Предельные режимы полета. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
3. Гирфанов А.М. Численные модели и методы исследования нагружения вертолета с бесшарнирным несущим винтом: Автореф. ... дис. д-р техн. наук. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 36 с.
4. Гирфанов А.М., Павлов В.В. Влияние гироскопических моментов на устойчивость дисколета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 3–7.
5. Гирфанов А.М., Ледянкина О.А. Методология применения искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагружения одновинтового вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 26–30.

6. Gori R.A. et al. Prediction and Simulator Verification of State-Space Rotor Modelling of Helicopter Manoeuvring Flight // Proc. of the 41st European Rotorcraft Forum, Sept. 1–4, 2015, Munich. Vol. 2. P. 1015–1023.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс системы визуализации вертолетного симулятора / Р.В. Сапронов, С.А. Михайлов, А.М. Гирфанов. № 2016610832; заявл. 25.11.2015; опубл. 20.02.2016.

Поступила в редакцию 13.09.16

Composite Model of a Research Flight Simulator for a Hingeless Rotor Helicopter

O.A. LEDYANKINA AND S.A. MIKHAILOV

This paper presents a composite model of a flight simulator. This simulator is intended for carrying out investigative tests of flight dynamics imitation models of a hingeless rotor helicopter. A schematic diagram, composition, and operation channels of the flight simulator software are presented. A possibility of applying the control lag is estimated.

Flight simulator, helicopter, imitation model, flight dynamics, control lag