

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ

Ключевые слова: управление, динамическое подобие, моделирование, летательный аппарат (ЛА), объект управления, теорема инвариантности динамического подобия.

Приводятся результаты исследования управления ЛА. Предложены условия динамического подобия. В работе предложен метод определения управления для обеспечения динамического подобия ЛА. В работе показана справедливость и сформулирована теорема инвариантности динамического подобия. Проведено моделирование и анализ управляемого движения базового и моделирующего ЛА в программном комплексе Matlab в системе Simulink.

Keywords: management, dynamic similarity, modelling, the flying device (FD), object of management, the theorem of invariancy of dynamic similarity.

Results of research of management FD are resulted. Conditions of dynamic similarity are offered. In work the method of definition of management for maintenance of dynamic similarity FD is offered. In work validity is shown and the theorem of invariancy of dynamic similarity is formulated. Modelling and the analysis of operated movement base and modelling FD in program complex Matlab in system Simulink is lead.

Для обучения пилотированию летательными аппаратами (ЛА) используются тренажёры и специальные учебные ЛА. При помощи таких технических систем происходит отработка и закрепление обучающимися методов пилотирования. С точки зрения экономической целесообразности обучение следует проводить на ЛА, который имеет минимальную стоимость эксплуатации [1]. Возникает задача пилотирования моделирующим летательным аппаратом, на котором реакция на управляющие воздействия была бы похожей на реакцию базового летательного аппарата.

В работе [2] сформулировано условие динамически подобного управления ЛА, получен алгоритм решения и проведено компьютерное моделирование, показавшее эквивалентность динамических характеристик моделирующего и базового ЛА.

Математические модели движения ЛА рассматриваются в работах [3,4].

Задача моделирования в полете на моделирующем ЛА динамики движения базового ЛА сводится к задаче обеспечения подобия движения базового летательного аппарата.

Движение базового и моделирующего ЛА определяется уравнениями

$$\begin{cases} m_{\delta} \ddot{y}_{\delta} = m_{\delta} g + u_{\delta} \\ m_{\mu} \ddot{y}_{\mu} = m_{\mu} g + u_{\mu} \end{cases} \quad (1)$$

Для обеспечения динамического подобия потребуем выполнения равенства

$$\ddot{y}_{\mu} = \ddot{y}_{\delta} \quad (2)$$

Уравнение (2) является условием динамического подобия и позволит обеспечить эквивалентность динамических свойств моделирующего и базового ЛА. Равенство (2) накладывает требования на ускорения управляемых объектов.

Управление моделирующим ЛА будем вычислять по формуле

$$u_{\mu} = u_{\delta} + \Delta u \quad (3)$$

Составляющая Δu входит в формулу для обеспечения одинаковых динамических характеристик моделирующего и базового ЛА.

Запишем второе уравнение из системы (1) с учётом (3):

$$m_{\mu} \ddot{y}_{\mu} = m_{\mu} g + u_{\delta} + \Delta u \quad (4)$$

Из первого уравнения системы (1) получим:

$$\ddot{y}_{\delta} = g + \frac{1}{m_{\delta}} u_{\delta} \quad (5)$$

В формулу (4) вставим выражение (5) и запишем:

$$m_{\mu} \left(g + \frac{1}{m_{\delta}} u_{\delta} \right) = m_{\mu} g + u_{\delta} + \Delta u \quad (6)$$

Из выражения (6) получим формулу

$$\Delta u = u_{\delta} \left(\frac{m_{\mu}}{m_{\delta}} - 1 \right) \quad (7)$$

В формулу (7) входят массовые характеристики моделирующего и базового ЛА, а также управление для базового ЛА.

Рассмотрим случай, когда в качестве условия динамического подобия выбрана эквивалентность свойств по скоростным характеристикам

$$\dot{y}_{\mu} = \dot{y}_{\delta} \quad (8)$$

Возможен вариант, когда требуется обеспечить эквивалентность свойств ЛА непосредственно по управляемой координате

$$y_{\mu} = y_{\delta} \quad (9)$$

Проведённые исследования показывают, что для условий динамического подобия (8) и (9), также как и для условия (2) управление моделирующим ЛА можно формировать по

формуле (3), а корректирующая составляющая Δu вычисляется по формуле (7).

Таким образом, управление моделирующего ЛА вычисляется по формуле (3) с учётом корректирующей составляющей Δu , которая вычисляется по формуле (7).

Проведём моделирование и анализ управляемого движения базового и моделирующего ЛА в программном комплексе Matlab в системе Simulink.

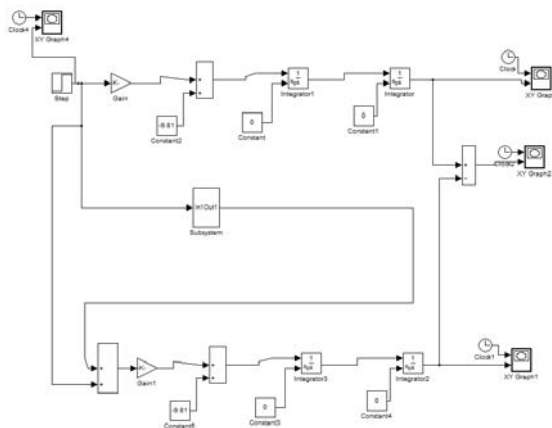


Рис. 1

На рисунке 1 приводится схема для проведения моделирования. Выбран вариант для анализа эквивалентности свойств по управляемой координате (9). В верхней части схемы помещена модель базового ЛА, а в нижней части схемы – моделирующего ЛА. В средней части схемы на рис.1 проводится формирование сигнала Δu при помощи элемента Subsystem.

Для случая, когда условие подобия выбрано в виде формулы (2), на схеме (рис.1) на элемент XYGraph2 подаётся сигнал $\varepsilon(t) = \ddot{y}_\delta - \ddot{y}_m$. Для анализа подобия по условию (8) на элемент XYGraph2 подаётся сигнал $\varepsilon(t) = \dot{y}_\delta - \dot{y}_m$.

Вычисление корректирующего сигнала Δu производится по методике, которая представлена в статье выше и формируется по схеме представленной на рис.2.

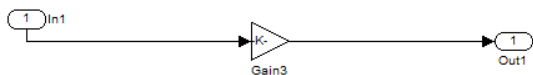


Рис. 2

Расчёты на компьютере проведены для входного сигнала в виде ступенчатого воздействия.

На рис. 3 представлен выходной сигнал $y_m(t)$ для моделирующего ЛА.

На рис.4 приводится информация о рассогласовании динамических характеристик $\varepsilon(t) = y_\delta - y_m$.

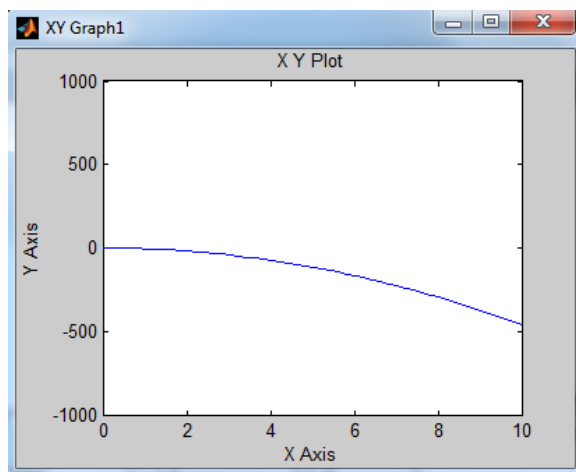


Рис. 3

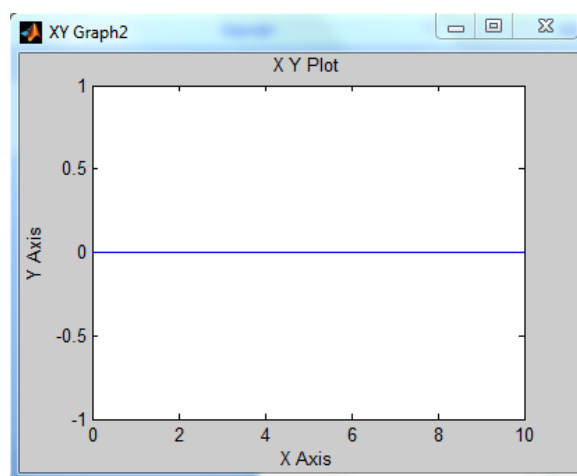


Рис. 4

Из рис.4 видно, что рассогласование $\varepsilon(t) \approx 0$ и это показывает эквивалентность динамических характеристик ЛА.

Для случаев условия динамического подобия по скорости (формула (2)) и координате (формула (8)) получены аналогичные результаты компьютерного моделирования.

На основе этого результата сформулируем теорему.

Теорема инвариантности динамического подобия

Управление моделирующим ЛА по формуле

$$u_m = u_\delta + \Delta u$$

с корректирующим сигналом

$$\Delta u = u_\delta \left(\frac{m_m}{m_\delta} - 1 \right)$$

является управлением, обеспечивающим динамически подобное движение для условий подобия

- 1) по ускорению $\ddot{y}_m = \ddot{y}_\delta$;
- 2) по скорости $\dot{y}_m = \dot{y}_\delta$;
- 3) по координате $y_m = y_\delta$.

Выводы

В статье приводятся результаты исследования управления ЛА. Для базового и моделирующего ЛА получена математическая модель по каналу движения по высоте. В работе предложена методика определения управления для обеспечения динамического подобия ЛА, в управление моделирующего ЛА вводится корректирующая составляющая. Получены расчётные формулы для определения корректирующей составляющей управления моделирующего ЛА для случаев условий динамического подобия по ускорению, по скорости и по координате. В работе показана справедливость и сформулирована теорема инвариантности динамического подобия.

Проведено моделирование управляемого движения базового и моделирующего ЛА в программном комплексе Matlab в системе Simulink. Анализ результатов компьютерного моделирования для предлагаемых условий динамического подобия и метода расчёта управления показывает:

1) схожесть движения ЛА по координатам канала высоты;

2) близость рассогласования динамических характеристик к нулю, то есть, эквивалентность динамических характеристик.

Следовательно, показана работоспособность метода определения управления для обеспечения динамического подобия базового ЛА на моделирующем ЛА.

Литература

1. Сайт Казанского вертолётного завода <http://kazanhelicopters.ru/>.
2. Терентьев С.А. Алгоритм динамически подобного управления летательным аппаратом. Вестник КГТУ: Т.15, №15, 2012. С. 252-254.
3. Берестов Л.М. Моделирование динамики вертолета в полете. М: Машиностроение, 1978.
4. Мхитарян А.М., Лазнюк П.С., Максимов В.С. и др. Динамика полета. – М.: Издательство Машиностроение, 1978.