

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. В работе [3] доказана справедливость Теоремы инвариантности динамического подобия, в которой показано, что корректирующая составляющая управления моделирующего ЛА одинаковая для случаев условий динамического подобия по ускорению, по скорости и по координате. В данной работе решается задача обеспечения динамического подобия на режимах поворота относительно центра масс ЛА. Особенностью рассматриваемого режима является различное расстояние от центра масс (центра разворота) до точки обеспечения динамического подобия (места расположения пилота) для базового и моделирующего летательных аппаратов. На рис.1 это расстояние для базового ЛА обозначено  $r_1$ , для моделирующего ЛА -  $r_2$ . Эти параметры являются радиусами поворота объектов управления. Рассмотрим поворот базового ЛА вокруг центра масс (цм1). Для точки обеспечения динамического подобия для момента времени  $t$  на участке поворота запишем соотношения для координат: (1) Рис. 1 - Схема разворота по окружности радиуса  $r_1$  для базового и  $r_2$  для моделирующего ЛА. При малом угле выражения (1) примут вид: (2) Если для моделирующего ЛА управление обеспечивает только разворот, то точка обеспечения динамического подобия совершает разворот вокруг центра масс цм2 по окружности радиуса  $r_2$ . Из рис.1 видно, что в этом случае траектории не будут совпадать. Для обеспечения подобного движения запишем следующие условия: (3) То есть для ЛА2 точка обеспечения динамического подобия П2 должна иметь те же координаты, что и П1 для ЛА1 для каждого момента времени. Математические модели движения ЛА рассматриваются в работах [4,5]. Запишем уравнения движения моделирующего ЛА: (4) Задача состоит в определении управления в (4) по трём каналам  $u_x, u_y, u_z$ , такого, чтобы выполнялись (3) при заданном  $r_2$  и рассчитанных из (1) и  $r_1$ . Такая задача в теории автоматического управления решается при помощи системы, представленной на рис. 2. Рис. 2 - Схема реализации метода динамически подобного управления моделирующим ЛА по совокупности координат  $\{x, y, z\}$  для обеспечения подобия по координате базового ЛА. Здесь обозначены Рег2 - регулятор для ЛА2, ОУ2 - объект управления - ЛА2 (моделирующий ЛА). Для обеспечения управления в данной схеме регулятор можно выбрать пропорционально-дифференциальный

(ПД) для каждого из трёх каналов. На рис.3 приведена компьютерная модель системы автоматического управления, обеспечивающей динамическое подобие при развороте по параметру  $\alpha$ . В левой части схемы формируется значение угла разворота базового ЛА. Далее в замкнутом контуре установлен ПД регулятор по рассогласованию параметра регулирования. Правее в замкнутом контуре находится модель объекта управления - моделирующего ЛА (ЛА2). Рис. 3 - Компьютерная модель системы автоматического управления в программном комплексе Matlab в системе Simulink, реализующая метод динамически подобного управления. Моделирование проводится для интервала времени 0 - 10 сек. Входной сигнал нарастает по линейному закону. Далее в схеме по кинематическим соотношениям формируется  $\alpha$ . Затем при помощи сумматора вычисляется величина рассогласования  $\Delta\alpha$ . Анализ компьютерных расчётов показывает, что рассогласование быстро уменьшается и далее имеет малую величину. Затем в схеме формируется управление  $u$ , которое подаётся на объект управления. Объектом управления является моделирующий ЛА, на выходе которого под воздействием собственной динамики и управления формируется выходной сигнал - выходная координата разработанной САУ. На рис.4 приводится график изменения величины рассогласования  $\Delta\alpha$ . Так как в результате работы САУ малая величина, то получили достаточно точное выполнение равенства  $\Delta\alpha = 0$ . То есть, обеспечили динамическое подобие по координате  $\alpha$ . Аналогичное компьютерное моделирование можно провести и для координат  $x$  и  $y$ . Рис. 4 - Результаты компьютерного моделирования график изменения величины рассогласования  $\Delta\alpha$ .

Сформулируем метод динамически подобного управления при развороте: 1. формируем условия динамического подобия для совокупности параметров; 2. на основе замкнутой системы автоматического управления, обеспечиваем динамическое подобие при развороте по совокупности параметров. Выводы В статье приводятся результаты исследования управления ЛА. Для базового и моделирующего ЛА получена математическая модель по каналу разворота вокруг центра масс. Сформулированы условия динамического подобия. Из-за различных геометрических размеров летательных аппаратов задача обеспечения динамического подобия моделирующего ЛА в работе решается управлением движением по трём каналам. В работе предлагается методика формирования управления для обеспечения динамического подобия ЛА по каналу разворота. В работе сформулирован метод динамически подобного управления по совокупности параметров при развороте. 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 при развороте; 2) близость рассогласования динамических характеристик к нулю, то есть,

эквивалентность динамических характеристик. Следовательно, показана работоспособность метода формирования управления для обеспечения динамического подоби́я базового ЛА на моделирующем ЛА на режиме разворота.