

УДК 629.7.076.001.57

И.Б. Кузнецов, к.т.н.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИЛОТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПО КРИТЕРИЮ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА

Учебно-тренировочный центр (г. Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: kuzn@smart.spb.ru

Рассмотрена математическая модель функционирования пилота посредством описания его деятельности по формированию опорной траектории и стабилизации на ней воздушного судна при пилотировании по приборам. Входом следящей системы предложено считать наблюдаемые пилотом по зрительному каналу отклонения воздушного судна от заданной траектории, а выходом – его управляющие воздействия по стабилизации воздушного судна.

Ключевые слова: заданные эксплуатационные ограничения, математическая модель, распределение и переключение внимания, следящая система, траектория полета.

Розглянуто математичну модель функціонування пілота через описання його діяльності за формуванням опорної траєкторії і стабілізації на ній повітряного судна в разі пілотування за приборами. Входом слідкуючої системи запропоновано рахувати відхилення повітряного судна від заданої траєкторії, що спостерігає пілот по зоровому каналу, а виходом – його керуючі дії зі стабілізації на неї повітряного судна.

Ключові слова: задані експлуатаційні обмеження, математична модель, розподілення і переключення уваги, слідкуюча система, траєкторія польотів.

Постановка проблемы

В процессе полета независимо от выполняемой пилотажной задачи пилот непрерывно получает через зрительный канал информацию о пространственном положении воздушного судна (ВС), динамике полета и работе технических систем.

Зрительное восприятие пилотом любого объекта как составная часть его зрительной деятельности является сложным процессом, в котором к деятельности зрительного канала присоединяются не только другие чувства, но еще и деятельность его мышления [1]. Поэтому основной методологический принцип исследования деятельности пилота при пилотировании по приборам состоит в том, что характеристики зрительной деятельности пилота определяются необходимой моторной деятельностью пилота по управлению ВС в пределах заданных эксплуатационных ограничений.

Цель работы

Методологическая необходимость выделения и решения задачи пилотирования по приборам в пределах заданных эксплуатационных

ограничений требует формализации деятельности пилота путем разработки математической модели его деятельности на уровне объективных математических методов, связывающих характеристики моторной деятельности пилота и соответствующие распределения и переключения его зрительного внимания пилота, которые обеспечивают управление ВС в заданных пределах эксплуатации.

Решение задачи моделирования

Для исследования большинства этапов полета динамика короткопериодического движения ВС в фазовом пространстве описывается линейным дифференциальным уравнением

$$L(X(t), U(t), n(t)) = 0. \quad (1)$$

где L – линейный дифференциальный оператор;

$X(t)$ – вектор текущего состояния ВС);

t – время;

$U(t)$ – вектор управления:

$U(t) = (u_1(t), \dots, u_k(t));$

$u_i(t)$ – воздействие пилота на i -й орган управления ВС;

$n(t)$ – вектор атмосферных возмущений, действующих на ВС.

Вектор основных полетных параметров (ПП) описывает реальную траекторию ВС в фазовом пространстве ПП:

$$X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t)).$$

Уравнение (1) является матричным видом системы дифференциальных уравнений движения ВС в возмущенной атмосфере [2; 3; 4].

Линейный дифференциальный оператор L i -го порядка в общем случае задается прямоугольной матрицей с элементами вида:

$$a_0 \frac{d^i}{dt^i} + a_1 \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} + \dots + a_i \frac{d^{i-i}}{dt^{i-i}} + \dots + a_i, \quad (2)$$

где a_i – коэффициенты, являющиеся функциями от аэродинамических характеристик ВС или константами.

В фазовом пространстве ПП заданная траектория описывается вектором

$$Y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t)).$$

Ограниченность психофизиологических возможностей пилота по точности управления ВС, инерционность технических систем ВС, атмосферные возмущения приводят к тому, что вектор $X(t)$ текущего состояния ВС не совпадает с вектором $Y(t)$ заданной траектории ВС. Поэтому основной, наиболее общей задачей пилотирования является формирование пилотом траектории $X(t)$, отклонение которой от заданной траектории $Y(t)$ не препятствует выполнению конкретных пилотажных задач и сохраняет требуемый уровень эксплуатационных ограничений и безопасности полета.

Качественное различие между вызываемыми расхождением векторов $X(t)$ и $Y(t)$ детерминированными факторами (аэродинамические характеристики ВС, инерционность технических систем ВС, ограниченность психофизиологических возможностей пилота) и случайными факторами, основным из которых является атмосферное возмущение, приводит к разделению общей задачи формирования траектории ВС на две задачи:

– задачу формирования опорной траектории ВС;

– задачу стабилизации ВС на опорной траектории.

Задача формирования опорной траектории ВС состоит в выборе и реализации пилотом управления

$$U_\phi(t) = (U_{\phi 1}(t), \dots, U_{\phi k}(t)),$$

обеспечивающего соответствие реальной траектории ВС заданной.

Реальную траекторию ВС, удовлетворяющую такому условию, будем называть опорной траекторией.

Действующие на ВС атмосферные возмущения приводят к отклонению ВС от его опорной траектории. Поэтому пилот должен одновременно с задачей формирования опорной траектории решать задачу стабилизации ВС на опорной траектории, состоящую в выборе и реализации стабилизирующего управления

$$U_{ст}(t) = (U_{ст 1}(t), \dots, U_{ст k}(t)),$$

сохраняющего допустимые отклонения реальной траектории ВС от опорной траектории.

Формальное разделение общей задачи формирования траектории ВС с заданной точностью на одновременно выполняемые пилотом задачу формирования опорной траектории ВС и задачу стабилизации ВС на опорной траектории имеет вполне определенный эргономический смысл, обусловленный качественным различием в характере управления, требуемого для выполнения каждой из задач.

При формировании опорной траектории ВС управление $U_\phi(t)$ выбирается пилотом без учета случайных атмосферных возмущений, поэтому имеет преимущественно детерминированный характер, обрабатываемый пилотом в процессе освоения данного типа ВС.

При стабилизации ВС на опорной траектории стабилизирующее управление $U_{ст}(t)$ выбирается пилотом в зависимости от случайного фактора – атмосферных возмущений, поэтому имеет стохастический характер.

Во многих случаях, например, при полете в турбулентной атмосфере на стационарных, непереходных этапах полета, у управлений $U_{\phi}(t)$ и $U_{ст}(t)$ числовые характеристики принципиально различны, поскольку $U_{\phi}(t)$ – функция, близкая к постоянной, в то время как $U_{ст}(t)$ – квазипериодическая функция, имеющая высокочастотную составляющую, а при сдвигах ветра ясно выраженный импульсный характер.

Различие в характерах управлений $U_{\phi}(t)$ и $U_{ст}(t)$ определяет качественное различие в зрительной деятельности пилота при выполнении рассматриваемых задач. Зрительная деятельность пилота при формировании опорной траектории носит, в основном, детерминированный характер, в то время как при стабилизации ВС она определяется действующими на ВС случайными атмосферными возмущениями.

Таким образом, для каждой из выделенных пилотажных задач описание основных характеристик зрительной деятельности пилота требует разработки специального, адекватного исследуемой задаче математического аппарата.

Разложение управления

$$U(t) = U_{\phi}(t) + U_{ст}(t)$$

в сумму детерминированной $U_{\phi}(t)$ и случайной $U_{ст}(t)$ составляющих позволяет вследствие линейности по функциям $X(t)$, $U(t)$, $n(t)$ общего уравнения (1) движения ВС получить из него уравнение формирования опорной траектории ВС и уравнение стабилизации ВС на опорной траектории.

Действительно,

$$L(X(t), U_{\phi}(t) + U_{ст}(t), n(t)) = 0,$$

поэтому вектор $X_{оп}(t)$ основных ПП, описывающий опорную траекторию ВС в фазовом пространстве ПП, удовлетворяет уравнению

$$L(X_{оп}(t), U(t), 0) = 0, \quad (3)$$

которое назовем уравнением формирования опорной траектории ВС.

Отклонение $X(t) - X_{оп}(t)$ реальной траектории ВС от его опорной траектории будет удовлетворять уравнению

$$L(X(t) - X_{оп}(t), U_{ст}(t), n(t)) = 0, \quad (4)$$

которое назовем уравнением стабилизации ВС на опорной траектории.

Очевидно, что уравнения (3), (4) являются линейными дифференциальными уравнениями с дифференциальным оператором L , определяющим основное уравнение (1) движения ВС.

Полученные уравнения (3), (4) позволяют выполнить математическое описание деятельности пилота (его модель) при формировании опорной траектории ВС и стабилизации ВС на опорной траектории.

Пусть на этапе полета длительностью T секунд заданная траектория ВС

$$Y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$$

в фазовом пространстве ПП достигается при оптимальном управлении

$$V(t) = (v_1(t), \dots, v_k(t)),$$

так что функции $Y(t)$, $V(t)$ удовлетворяют уравнению формирования опорной траектории

$$L(Y(t), V(t)) = 0.$$

Действия пилота при формировании опорной траектории ВС заключаются в выборе и реализации пилотом управления

$$U_{\phi}(t) = (u_{\phi 1}(t), \dots, u_{\phi k}(t)),$$

при котором опорная траектория ВС

$$X_{оп}(t) = (x_{оп 1}(t), \dots, x_{оп n}(t)),$$

то есть решение уравнения

$$L(X_{оп}(t), U_{\phi}(t), 0) = 0$$

на всем этапе полета соответствует с заданной вектором допустимых отклонений

$$d = (d_1, \dots, d_n), \quad d_i > 0, \quad \text{где } i = 1, \dots, n,$$

точностью заданной траектории $Y(t)$, то есть выполнены неравенства

$$|x_{оп i}(t) - y_i(t)| \leq d_i,$$

где $i = 1, \dots, n; t \in [0, T]$.

Специфика такого управления заключается в том, что управление $U_{\phi}(t)$, которым пилот формирует опорную траекторию ВС должно быть реализовано соответствующими органами управления ВС. При этом в приборном полете обязательно необходима

взаимосвязь управляющей и зрительной деятельности пилота в условиях заданных эксплуатационных ограничений.

Для того, чтобы дать полное описание деятельности пилота при стабилизации ВС на опорной траектории, проведем предварительный анализ нахождения ВС на стабилизируемой траектории. Обозначим через

$$P(t) = (p_1(t), \dots, p_n(t))$$

вектор отклонений реальной траектории ВС $X(t)$ от опорной траектории $X_{оп}(t)$ в фазовом пространстве ПП:

$$P(t) = X(t) - X_{оп}(t),$$

который возникает вследствие действия на ВС случайных атмосферных возмущений $n(t)$.

Для обеспечения требуемой точности (заданных эксплуатационных ограничений) соответствия реальной траектории ВС его опорной траектории пилот должен сформировать стабилизирующее управление $U_{ст}(t)$, при котором отклонения $P(t)$, удовлетворяющие стохастическому уравнению стабилизации ВС на опорной траектории (4):

$$L(P(t), U_{ст}(t), n(t)) = 0,$$

на всем временном интервале $[0, T]$ исследуемого этапа полета не превосходят допустимых величин, задаваемых вектором

$$e = (e_1, \dots, e_n), e_i > 0; i = 1, \dots, n:$$

$$|p_i(t)| < e_i, \quad (5)$$

где $i = 1, \dots, n$ при любом $t \in [0, T]$.

Для каждого ПП его отклонение $p_i(t)$ в каждый момент времени от значения на опорной траектории является случайной величиной, поэтому корректная формализация ограничений (5), то есть цели пилота в задаче стабилизации ВС, должна иметь вероятностный вид

$$P(|p_i(t)| < e_i),$$

при любом

$$t \in [0, T] \geq q_i, i = 1, \dots, n$$

для каждого ПП, а вероятность P нахождения его отклонения $p_i(t)$ в заданных ограничениях в любой момент времени должна быть не меньше некоторой пороговой для данного ПП вероятности q_i . Выбор значений пороговых вероятностей $q_i, i = 1, \dots, n$ для каждого ПП производится на основе общих требований полетного задания и обеспечения безопасности полета. Величины допустимых отклонений i -го ПП e_i в задаче стабилизации и d_i в задаче формирования опорной траектории задаются из следующих условий:

– их сумма $(d_i + e_i)$ составляет максимально допустимое расхождение в значениях i -го ПП реальной траектории ВС и заданной траектории:

$$|x_i(t) - y_i(t)| \leq d_i + e_i,$$

где $i = 1, \dots, n$ при любом $t \in [0, T]$;

– составляющие величины d_i и e_i выбираются так, чтобы на исследуемом этапе полета при формировании опорной траектории по i -му ПП с точностью d_i оставался достаточный для стабилизации i -го ПП запас по ограничению e_i .

Приведенные исследования позволяют выполнить математическое описание деятельности пилота при стабилизации ВС на опорной траектории, т.е. обосновывают формулировку: математическая модель деятельности пилота при стабилизации ВС на опорной траектории.

Пусть на этапе полета длительностью T секунд вектор

$$P(t) = (p_1(t), \dots, p_n(t))$$

в фазовом пространстве ПП описывает возникающие под влиянием атмосферных возмущений $n(t)$ отклонения реальной траектории ВС от его опорной траектории, которые для обеспечения заданной точности пилотирования не должны превышать величины

$$e = (e_1, \dots, e_n), e_i > 0, i = 1, \dots, n.$$

Задача стабилизации ВС состоит в выборе и реализации пилотом стабилизирующего управления

$$U_{ст}(t) = (U_{ст1}(t), \dots, U_{ст-k}(t)),$$

при котором вероятности нахождения отклонений $P(t)$, удовлетворяющих стохастическому уравнению стабилизации ВС на опорной траектории

$$L(P(t), U_{\text{ст}}(t), n(t)) = 0,$$

в заданных вектором e ограничениях не меньше пороговых вероятностей q_1, \dots, q_n , то есть

$$P(|p_i(t)|) < e_i$$

при любом

$$t \in [0, T] \geq q_i, \text{ где } i = 1, \dots, n.$$

Выводы

Математическая модель деятельности пилота может быть представлена в виде следящей системы и объективных математических методов описания его деятельности при формировании опорной траектории и стабилизации на ней ВС в заданных пределах эксплуатации.

При этом входом следящей системы являются наблюдаемые пилотом по зрительному каналу отклонения ВС от заданной траектории, а выходом – его управляющие воздействия по стабилизации на ней ВС.

Литература

1. *Завалова Н.Д.* Образ в системе психологической регуляции деятельности / Н.Д. Завалова, Б.Ф. Ломов, В.А. Пономаренко. – М.: Наука, 1986. – 174 с.
2. *Белгородский С.Л.* Автоматизация управления посадкой самолета / С.Л. Белгородский. – М.: Транспорт, 1972. – 351 с.
3. *Боднер В.А.* Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты / В.А. Боднер, М.С. Козлов. – М.: Оборонгиз, 1961. – 508 с.
4. *Доброленский Ю.П.* Динамика полета в неспокойной атмосфере / Ю.П. Доброленский. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2011.