

# Исследование движения БЛА в условиях неоднородности атмосферы и изменения динамических свойств БЛА

*В.В. Макаров,  
с.н.с., к.т.н., makarov@ipu.ru,  
ИПУ РАН, г. Москва*

Рассматривается расширение математической модели в разрабатываемой имитационной модели системы управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) на уровне визуального проекта с использованием технологии MDD/MDA. Расширение направлено на моделирование движения БЛА по заданному маршруту в условиях неопределенности – неоднородности атмосферы и изменения динамических свойств БЛА. Под БЛА понимаем крылатые аппараты самолетных схем ближнего и среднего радиуса действия. Функции пилота ЛА выполняет человек-оператор, включенный в контур управления комплексом. В системе предусмотрена возможность автономного движения БЛА через заданные точки.

При прохождении БЛА вблизи зон атмосферной деятельности на него воздействуют вертикальные и горизонтальные порывы ветра. В работе рассматривается изменение величины скорости и направления ветра каждые 4 секунды, моделируемые функцией, состоящей из длиннопериодической компоненты и короткопериодической случайной компонент. В этом случае изменится дифференциальное уравнение, отвечающее за определение угла атаки. Наличие вертикальных порывов ветра приводит к изменению угла атаки.

У всех летательных аппаратов присутствует определенное значение угла атаки, называемое критическим. На углах атаки, больших критического, происходит срыв потока, и подъемная сила профиля крыла падает. Срыв потока может привести к сваливанию БЛА.

В работе рассмотрено движение БЛА во всех возможных условиях атмосферных явлений, кроме урагана: грозное облако, порывы ветра, восходящие и нисходящие потоки воздуха, воздушные ямы, болтанка.

Разработан интерфейс, для задания различных атмосферных явлений (неоднородностей атмосферы) с разной степенью интенсивности и разной степенью загрузки топливом БЛА.

Полетное задание представляет собой траекторию движения в виде множества случайных точек, окрестности которых должен пересечь БЛА. Задача состоит в оценке возможности конкретного БЛА посетить заданные точки в различных условиях атмосферных воздействий и загрузки БЛА.

The expansion of the mathematical model in the developed simulation model of the Unmanned Air Vehicle (UAV) control system at the level of the visual project using MDD/MDA technology is considered. The expansion is aimed at modeling the motion of UAV along a given route under conditions of uncertainty – heterogeneity of the atmosphere and changes in the dynamic properties of UAV. Under UAVs understand winged aircraft schemes near and medium range. The functions of the pilot of the Aircraft are performed by the human operator included in the control loop of the complex. The system provides the possibility of Autonomous movement of UAV through the specified points.

With the passage of the UAV in close proximity to areas of atmospheric activities it is exposed to vertical and horizontal gusts of wind. This paper examines the changing value of the speed and direction of the wind every 4 seconds, the simulated function, consisting of components of short-period and long-period random component. In this case, the differential equation responsible for determining the angle of attack will change. The presence of vertical gusts of wind leads to a change in the angle of attack.

All aircraft present a certain value of the angle of attack, called stalling incidence. At angles of attack, large Angle of stall is the failure of the flow and the lift of the airfoil decreases. Disruption of the flow can lead to the spin stalling of UAVs.

In operation the movement of the UAV under all conditions of atmospheric phenomena, except of a hurricane: storm cloud, gusts of wind, updrafts and downdrafts of air, air pockets and turbulence.

The interface is developed to specify different atmospheric phenomena (inhomogeneities of the atmosphere) with different degrees of intensity and different degree of UAV fuel loading.

Flight task is a trajectory in the form of a set of random points, the vicinity of which must cross the UAV. The task is to assess the possibility of a particular UAV to visit the specified points in different conditions of atmospheric influences and UAV loading.

## Введение

Актуальность работы заключается в исследовании современной технологии создания и тестирования СУ беспилотными летательными аппаратами (главным образом программного обеспечения этой распределенной системы), управляемой моделями этой системы и основанной на использовании моделей и ООП. Такая технология известна как разработка, управляемая моделями (ModelDrivenDevelopment), и процесс проектирования, управляемый моделями (ModelDrivenArchitecture), с использованием универсального языка моделирования и визуального проектирования UML 2.2. Отраслевые аналитические отчеты показывают значительные преимущества управляемой моделями разработки, а положения о моделировании, добавленные в стандарт DO-178C, ещё больше повышают важность моделирования в процессе разработки. Преимущества такого подхода, в отличии от традиционного программирования контроллеров, заключаются в [2,3]:

1. Использовании средств визуального проектирования (UML, SysML, Simulink).
2. Возможности имитации работы системы для проверки разрабатываемого ПО.
3. Генерировании исходного кода на целевой контроллер.
4. Тестирование, основанное на моделях, как возможность отслеживать работу системы при помощи анимированных UML-диаграмм.

5. Возможность отслеживания артефактов жизненного цикла (например, требования, техническое задание, описание архитектуры приложения, исходный код, тесты и т.д.).

В работе ставится задача расширения имитационной модели системы управления беспилотным летательным аппаратом на уровне визуального проекта. Необходимо математически описать воздействие неоднородностей атмосферы (горизонтальные и вертикальные ветра, воздушные ямы и т.д.) на движение БЛА, программно реализовать описанное расширение в среде IBM Rational Rhapsody, произвести интеграцию системы визуализации и проекта.

Представим описание модели БЛА в нотации IDEF0 (рис.1):



рис. 1. IDEF0-диаграмма имитационной модели системы управления БЛА

### Модели атмосферных движений воздуха

Рассмотрим модели атмосферных движений воздуха, оказывающих влияние на движение БЛА.

Турбулентность – физическое явление, характеризующееся нерегулярными взаимными перемещениями объёмов среды (жидкости или газа) и их перемешиванием и сопровождающееся хаотическими изменениями газодинамических переменных в пространстве и времени.

Атмосферная турбулентность – одно из характерных свойств атмосферы Земли, состоящее в беспорядочном изменении давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра [1].

Вертикальные движения воздуха, направленные соответственно вверх и вниз. Чаще встречаются в областях вблизи атмосферных фронтов, где преобладают восходящие движения, и вблизи центров циклонов и антициклонов, где преобладают соответственно восходящие и нисходящие движения. В областях, где интенсивно формируются кучевые облака, чередуются восходящие (в облаках) и нисходящие (вне их) движения.

В работе восходящие и нисходящие потоки воздуха будут симулироваться изменением величины скорости и направления вертикальных порывов ветра каждые 4 секунды.

Воздушная яма – термин для обозначения предполагаемых ям, в которых наблюдается внезапное падение самолета вниз, не зависящее от управления самолетом. В действительности это падение объясняется вертикальными воздушными течениями, направленными сверху вниз. Воздушные ямы могут привести к сваливанию БЛА.

В работе воздушные ямы будут симулироваться изменением величины скорости ветра раз в 4 секунды, с единственным направлением – сверху вниз.

БЛА, пролетающий сквозь грозовое облако, обычно попадает в «болтанку». Болтанка – возмущённое движение летательного аппарата с достаточно большой частотой под действием атмосферной турбулентности. Атмосферная турбулентность вызывает перемещение центра масс летательного аппарата в пространстве и угловые колебания вокруг центра масс. Параметрами, характеризующими движение летательного аппарата во время болтанки, являются угол атаки и угол скольжения [1].

В работе болтанка будет симулироваться одновременным воздействием на БЛА и горизонтальных, и вертикальных порывов ветра, с периодичностью раз в 4 секунды, причем скорость порывов по плоскостям будет различаться. Порыв ветра – порывами принято считать кратковременные (несколько секунд) и сильные перемещения воздуха.

При прохождении вблизи зон атмосферной деятельности, таких как атмосферные фронты, грозовые очаги, струйные течения и т.д., возможно воздействие на БЛА вертикальных и горизонтальных порывов ветра. Максимальная скорость порывов в условиях умеренной болтанки составляет 5 – 7 м/с (метров в секунду), а при попадании в область интенсивных метеоявлений может достигать 10 – 15 м/с, причем, если горизонтальный масштаб возмущений равен 0.5 – 1 км (километров), а скорость БЛА высока, то величина и направление ветра могут изменяться каждые 2 – 4 секунды.

Для определения скорости ветра, в работе была рассмотрена функция, состоящая из длиннопериодической части и части, отвечающей за случайные порывы:

$$w(t) = w_0 * \cos(\omega * t) + w_1 * R(t),$$

где  $R(t)$  есть случайная функция, принимающая целочисленные значения, с интервалом значений от -1 до 1,  $w_0$  – первая постоянная, может принимать различные целочисленные значения, в зависимости от желаемых границ

скорости ветра (в работе рассматривается значение, равное 2 м/с),  $\omega = \frac{2\pi}{150\text{с}^{-1}}$ ,  $w_1$  – вторая постоянная, также как и первая, может принимать различные целочисленные значения, в зависимости от желаемых границ скорости ветра (в работе по умолчанию рассматривается значение, равное 1 м/с, но есть возможность изменения между еще двумя значениями). В работе рассматривается изменение величины скорости и направления ветра каждые 4 секунды.

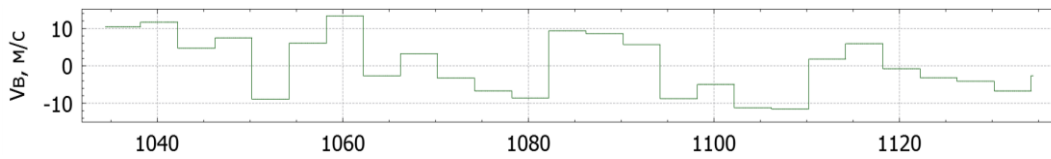


рис. 2. Пример зависимости скорости вертикальных порывов ветра от времени

На (рис. 2)  $V_{\text{в}}$  – скорость ветра в м/с, причем отрицательные значения скорости соответствуют направлению потока ветра вертикально вверх, а положительные вертикально вниз;  $T$  есть время, прошедшее с запуска БЛА, в секундах.

До высоты, равной 2 километрам, изменениями плотности воздуха можно пренебречь, поэтому этот аспект в работе не учитывается, плотность воздуха равна постоянному значению.

Воздействие на самолет с вертикальной скоростью  $w_{\text{в}}$  вызывает изменение угла атаки  $\Delta\alpha$  (рис. 3), которое можно оценить, как:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{w_{\text{в}}}{V}\right)$$

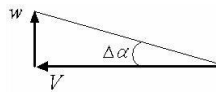


рис. 3. Изменение угла атаки при воздействии вертикального порыва ветра

Таким образом, преобразуем уравнение, отвечающее за определение угла атаки во время движения БЛА:

$$\ddot{\alpha} + 1,2\dot{\alpha} + 0,3\alpha + 0,3\delta_{\text{в}} + \Delta\alpha = 0$$

Из-за внесенных изменений изменится и задача Коши второго порядка:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_1 \\ \dot{\alpha}_1 = \alpha_2 \\ \dot{\alpha}_2 = -1,2\alpha_2 - 0,3\alpha_1 - 0,3\delta_{\text{в}} - \Delta\alpha \end{cases}$$

Таким образом, применяя численный метод Эйлера, получим новое решение:

$$\begin{cases} \alpha_1(t_{m+1}) = \alpha_1(t_m) + dt\alpha_2(t_m) \\ \alpha_2(t_{m+1}) = \alpha_2(t_m) + dt(-1,2\alpha_2(t_m) - 0,3\alpha_1(t_m) - 0,3\delta_{\text{в}} - \Delta\alpha) \end{cases}$$

Также, необходимо отметить, что у всех летательных аппаратов присутствует определенное значение угла атаки, называемое критическим. Критическим углом атаки называют такой угол атаки профиля крыла, при котором его аэродинамическая подъемная сила достигает своего максимального значения при определенных значениях скорости и плотности набегающего потока. На углах атаки, больших критического, происходит срыв потока, и подъемная сила профиля крыла падает. Срыв потока может привести к сваливанию БЛА.

Сваливание – это резкое падение подъемной силы в результате нарушения нормальных условий обтекания крыла воздушным потоком. В условиях нормального обтекания крыла потоком воздуха создается достаточная подъемная сила, и самолёт ведёт себя устойчиво. При нарушении нормального обтекания крыла подъемная сила резко падает, и самолёт «сваливается с потока» — самопроизвольно меняет углы тангажа и крена. К сваливанию приводит превышение максимально допустимых углов атаки, что может произойти в результате падения скорости самолёта, работы рулями, изменения плотности и направления потока воздуха и т. п.

Например, при значениях  $w = 8$  м/с и  $V = 200$  м/с, получим  $\Delta\alpha \sim 2,3^\circ$ , что для некоторых БЛА может приблизить значение угла атаки к критическим отметкам. Опытным путем было выявлено, что для используемого в работе БЛА RQ-4 GlobalHawk критические значения угла атаки приближаются к  $30^\circ$ , что значит, что превышение допустимого угла атаки начинается со значения  $\alpha > 30^\circ$ .

Подобным образом можно описать влияние горизонтальных порывов ветра. Воздействие на самолет с горизонтальной скоростью  $w_{\text{г}}$  вызывает изменение угла скольжения  $\Delta\beta$  (рис. 4), которое можно оценить, как:

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{w_{\text{г}}}{V}\right)$$



рис. 4. Изменение угла скольжения при воздействии горизонтально порыва ветра

Преобразуя уравнение, отвечающее за изменение угла скольжения, получим:

$$\ddot{\beta} + 1,2\dot{\beta} + 0,3\beta + 0,3\delta_{\text{г}} + \Delta\beta = 0$$

Аналогичным образом получаем измененную задачу Коши второго порядка:

$$\begin{cases} \beta = \beta_1 \\ \dot{\beta}_1 = \beta_2 \\ \dot{\beta}_2 = -1,2\dot{\beta}_1 - 0,3\beta_1 - 0,3\delta_H - \Delta\beta \end{cases}$$

Применяя численный метод Эйлера, получаем:

$$\begin{cases} \beta_1(t_{m+1}) = \beta_1(t_m) + dt\beta_2(t_m) \\ \beta_2(t_{m+1}) = \beta_2(t_m) + dt(-1,2\beta_2(t_m) - 0,3\beta_1(t_m) - 0,3\delta_H - \Delta\beta) \end{cases}$$

### Реализация моделей атмосферных движений воздуха

Возможность активации влияния ветра определяется по текущему состоянию БЛА. Пока аппарат находится в предстартовом состоянии Idle (ожидание на взлётно-посадочной полосе), возможность активации влияния ветра отсутствует, однако, как только проверка связи между аппаратом и системой управления проходит успешно, и оператор инициализирует начало полета БЛА, у него также появляется возможность активировать один из трех типов атмосферных явлений – вертикальные порывы ветра, воздушную яму и грозовое облако («болтанка»). Выбрав один из представленных типов, оператор нажимает соответствующую кнопку на панели интерфейса, что приводит к срабатыванию события (рисунок 5), соответствующего выбранному типу явления. На (рисунке 5) представлены два состояния, Idle – состояние ожидания активации какого-либо внешнего воздействия (что значит, что пока активно это состояние, никакие внешние воздействия на аппарат не влияют) и Wind\_Timer – состояние, означающее, что некоторое влияние было активировано и активно в данный момент. Эти события изменяют значение предикатов-защитников, соответствующих выбранному воздействию, на true и приводят к переключению на состояние Wind\_Timer. Предикаты-защитники определяют, какое именно воздействие было выбрано, а также ограничивают симуляцию ветра по плоскостям (вертикальной или горизонтальной) и по направлению скорости.

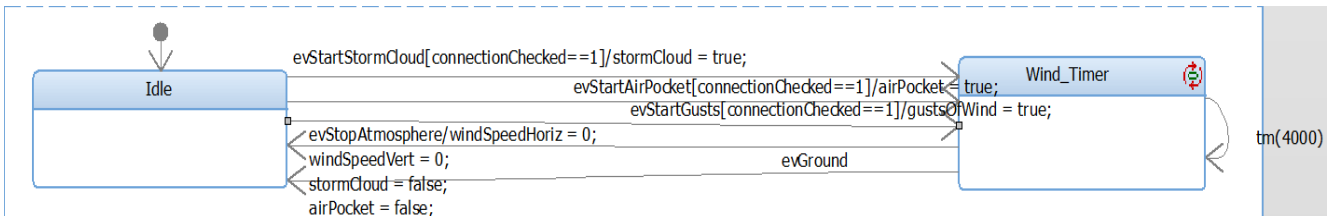


рис. 5 – UML-диаграмма состояний ветровых условий

### Тестирование и анимационное тестирование разработанной системы



рис. 6. Интерфейс системы управления БПЛА

Подсистема реализована на языке программирования C#. Для работы данного программного обеспечения с системой её достаточно поместить в папку проекта IBM Rational Rhapsody вместе с XML файлами UAVconfigurations.xml, path.xml, содержащими сохранённые наборы параметров или ЛТХ БЛА и маршруты движения соответственно.

Для инициализации ЛТХ самого БЛА за основу был взят американский стратегический разведывательный БЛА RQ-4 Global Hawk. ЛТХ взяты из [5, 7].

Для тестирования разработанной системы был проведен эксперимент с целью проверки влияния атмосферных неоднородностей на движение БЛА в моделируемой системе.

Для оценки точности движения БЛА по заданному маршруту было принято решение использовать интегральные оценки пройденного и запланированного расстояний. При последовательном движении по точкам маршрута происходит расчёт реально пройденного расстояния и запланированного в соответствующие переменные. При завершении движения указанные интегральные оценки записываются в файл.

Гипотеза эксперимента: при влиянии неоднородностей атмосферы на БЛА реальное пройденное расстояние при движении по заданному маршруту будет больше, чем расстояние, пройденное при отсутствии таких влияний, а также имеется вероятность вообще не пройти заданный маршрут.

Переменные эксперимента:

1. Неоднородности атмосферы (вертикальные порывы ветра, воздушные ямы, грозовые облака).
2. Скорость ветра.
3. Маршрут.

Для проведения эксперимента было задано два маршрута движения БЛА. В табл.1 приведен пример задания маршрута.

Таблица 1

Координаты точек маршрута движения БЛА №1

	Точка №1	Точка №2	Точка №3	Точка №4
X, м	12000	20000	28000	35000
Y, м	2000	0	400	0
Z, м	200	200	300	250

Масса топлива была принята равной 500 килограммам, тяга на протяжении всего пути равна максимально допустимой тяге для конкретного взятой модели БЛА. В качестве эталонной точности была взята точность прохождения маршрута при отсутствии каких-либо внешних воздействий.

При проведении эксперимента было рассмотрено 3 модели БПЛА: RQ-4 GlobalHawk, Ту-141 Стриж, X-47A.

Летно-технические характеристики БЛА RQ-4 GlobalHawk представлены в[5, 7].

Для описанных выше маршрутов у БЛА RQ-4 GlobalHawk планируемое расстояние для первого маршрута равно 31047 метрам, для второго – 29182 метрам, а результат прохождения при отсутствии внешних воздействий равен 31278 и 29683 метрам соответственно. Отклонение от планируемого расстояния – 231 и 501 метр соответственно.

Были получены следующие результаты:

Таблица 2

Результаты эксперимента для маршрута №1

Атмосферное явление	№ теста	Скорость ветра, м/с	Планируемое расстояние, м	Реально пройденное расстояние, м	Отклонение от планируемого, м
Грозовое облако	1	7	31047	31448	401
	2		31047	31448	401
	3		31047	31447	400
	1	14	31047	31562	515
	2		31047	31565	518
	3		31047	31563	516
Воздушная яма	1	7	31047	31445	398
	2		31047	31446	399
	3		31047	31446	399
	1	14	31047	31469	422
	2		31047	31473	426
	3		31047	31471	424
Вертикальные порывы ветра	1	7	31047	31437	390
	2		31047	31435	388
	3		31047	31436	389
	1	14	31047	31443	396
	2		31047	31446	399
	3		31047	31445	398

Среднее отклонение от маршрута – 421 метр. Наиболее серьезные отклонения наблюдаются при грозовом облаке, наименее – при вертикальных порывах ветра.

## Литература

1. Свищёв Г.П.: Авиация: Энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
2. Полтавский, А.В. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов [Текст]: научное издание / А.В. Полтавский, А.А. Бурба, А.Е. Аверкин, В.В. Макаров, В.В. Маклаков. - М.: ИПУ РАН, 2015. - 127 с.
3. Douglass B. P. Real-Time UML Workshop for Embedded Systems. – Oxford, UK, Elsevier Inc., 2007. p.408.
4. Зыль С.Н. Проектирование, разработка и анализ программного обеспечения систем реального времени. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 336с.
5. Иванов М.С. Беспилотные летательные аппараты. [Текст]: Справочное пособие. / под общ. ред. С.А. Попова; ВУНЦ ВВС «ВВА». – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. 619с.
6. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн.1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Монография/ под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. – М.: Радиотехника, 2016. – 512 с. Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА. Монография/ под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. – М.: Радиотехника, 2016. 824 с.
7. Разведывательный БПЛА RQ-4 GlobalHawk // Беспилотные летательные аппараты URL: <http://bp-la.ru/ctategicheskij-razvedyvatelnyj-bpla-rq-4-global-hawk/> (дата обращения: 08.04.2017).