

Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в режиме «зависание»

Студент: Андрющенко Т. А.
научный руководитель:
к. т. н., н. с. ИАиЭ СО РАН
Филиппов М. Н.

Актуальность работы

Работа посвящена исследованию летательного аппарата конструктивно обеспечивающего режимы вертикального взлёта и посадки.

При ручном управлении с помощью аппарат может потерять управление и дестабилизироваться.

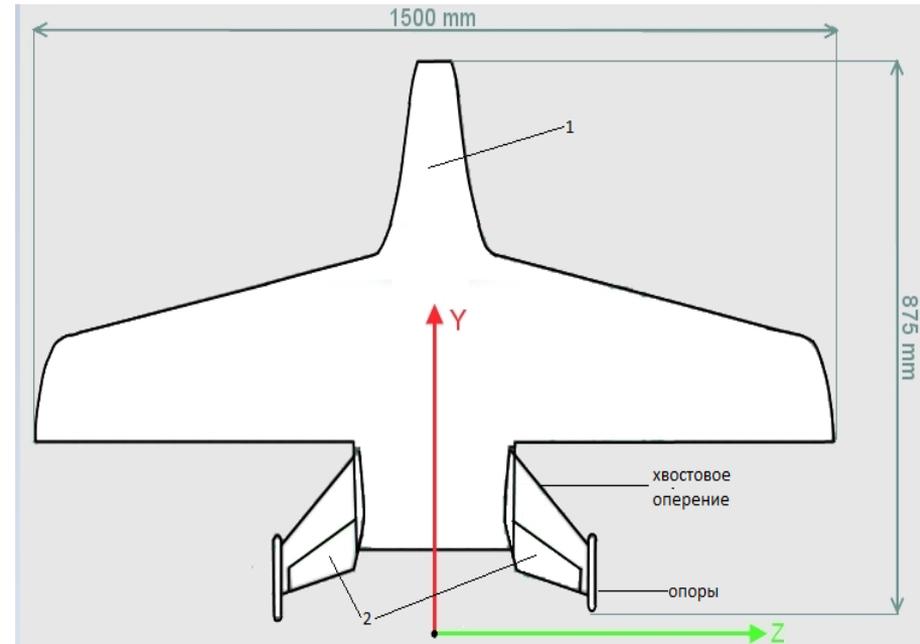
Для решения конкретных задач требуется система автоматического управления.

Исследуемый БПЛА

Тяга осуществляется за счет электрического двигателя, расположенного на фюзеляже (1).

Аппарат обладает уникальными конструктивными особенностями: роль управляющих поверхностей классических самолётов сочетают в себе 4 подвижных элевона (2). Элевоны расположены в хвостовой части аппарата на равном расстоянии от продольной оси Y .

Модель относится к классу «мини», масса аппарата – около 4-х килограммов.



Бортовое оборудование

Управление самолетом реализовано на базе контроллера «ArduPilot mega 2560».

«ArduPilot» включает в себя следующее оборудование:

- трёхосевой гироскоп;
- трёхосевой акселерометр;
- барометрический датчик давления для определения высоты;
- подключаемый GPS модуль;
- контроль вольтажа батареи;
- на борту 16Mb памяти для хранения информации о полёте (логов).

Цель работы

Разработка быстродействующей системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) в режиме «зависание».

Разрабатываемая система должна обеспечить следующее:

- вертикальный взлет;
- приближение к заданной точке пространства;
- удержание аппарата и стабилизацию.

Задачи

- построение математической модели исследуемого БПЛА;
- разработка имитационной динамической модели с поддержкой ручного управления;
- визуализация и симуляция полёта аппарата, сбор телеметрической информации в режиме реального времени;
- разработка системы управления БПЛА в режиме «зависание»;
- отработка системы управления на базе компьютерной модели.

Имитационная модель в среде JSBSim

JSBSim – программа, позволяющая имитировать полёт летательного аппарата в атмосфере при заданных характеристиках модели.

Описание характеристик БПЛА составлено в виде взаимосвязанных XML файлов, в которых посекционно описаны метрические характеристики аппарата, двигатель, аэродинамические каналы управления и т. д.

Визуализация выполнена в авиасимуляторе FlightGear.

Результаты моделирования в JSBSim

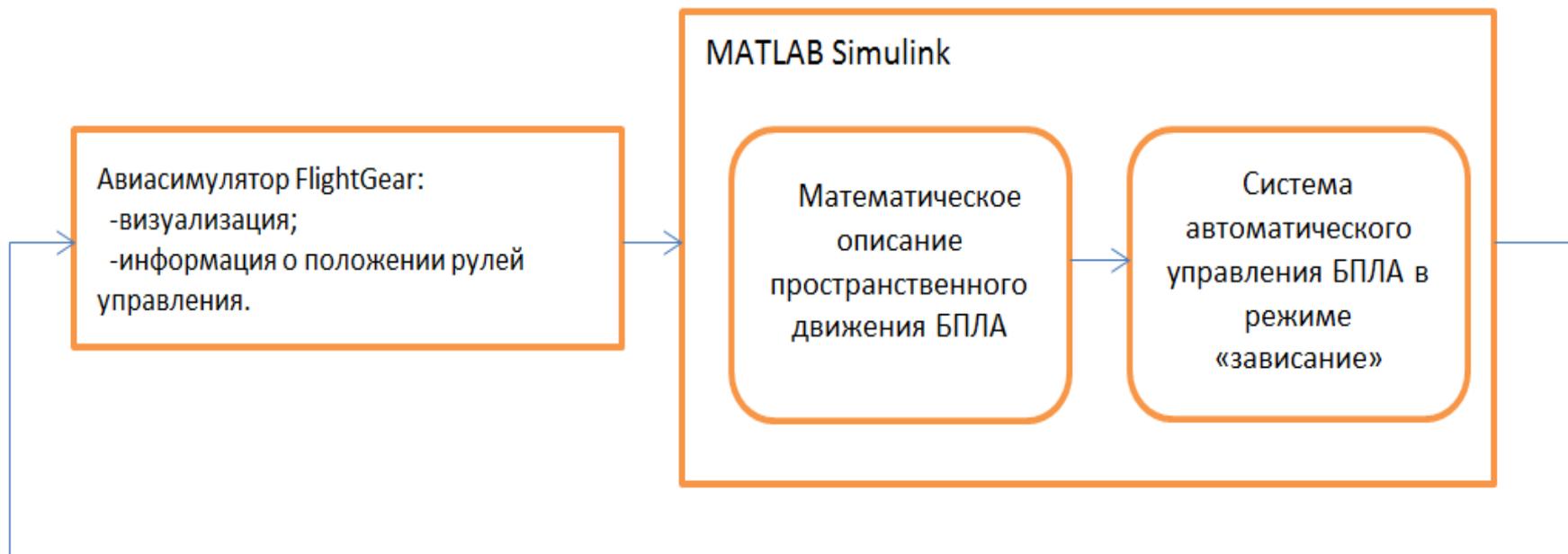
Создана упрощенная модель для проверки физических ограничений исследуемого аппарата и принципиальной управляемости. Реализовано ручное управление.



Решено разработать расширенную имитационную модель на основе полного математического описания в среде MATLAB Simulink, которая предоставляет возможности интерактивного изменения параметров и наглядности.

Расширенная имитационная модель в MATLAB Simulink

Упрощенная схема имитационного моделирования:

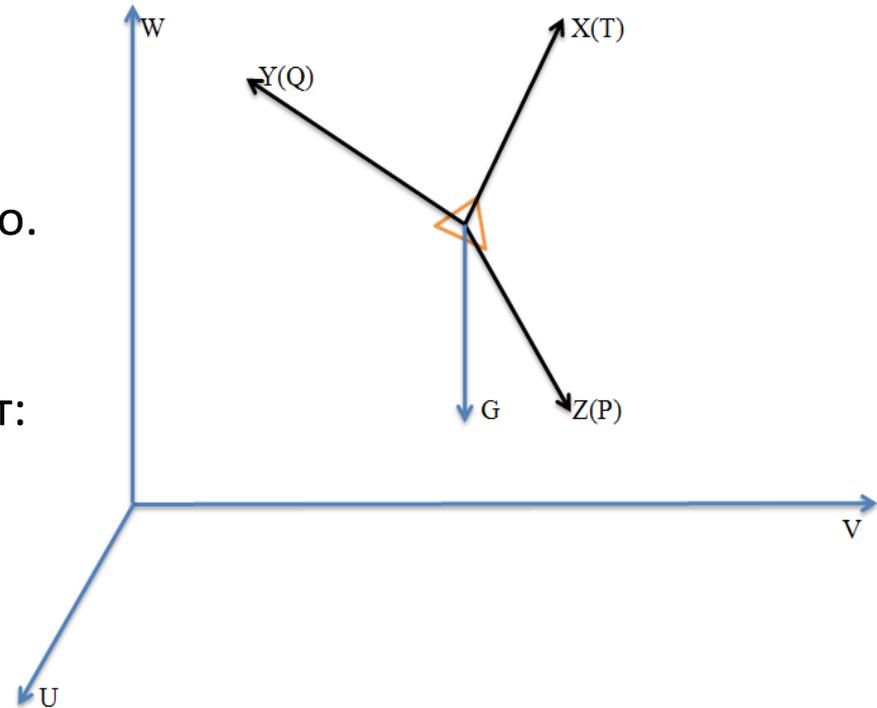


Модель БПЛА описана с помощью набора математических функций. Для упрощения моделирования система представлена в виде блоков.

Движение БПЛА в пространстве

Общее движение летательного аппарата складывается из трёх взаимовлияющих движений: продольного бокового и вертикального.

При моделировании пространственного движения БПЛА использованы две системы координат: связанная: $OXYZ$ и земная O_3UVW .



Силы, действующие по трем осям в связанной системе координат обозначены как T , P , Q . За начало земной системы координат O_3 принята точка старта аппарата.

Аэродинамические силы в вертикальном полёте

$$T = F_{\text{тяги}} - G \cos(\theta) - F_{\text{соп}},$$

где

$$F_{\text{соп}} = (k_T S + S_1 \sin(\gamma_1) + S_2 \sin(\gamma_2) + S_3 \sin(\gamma_3) + S_4 \sin(\gamma_4)) \frac{\rho V^2}{2}.$$

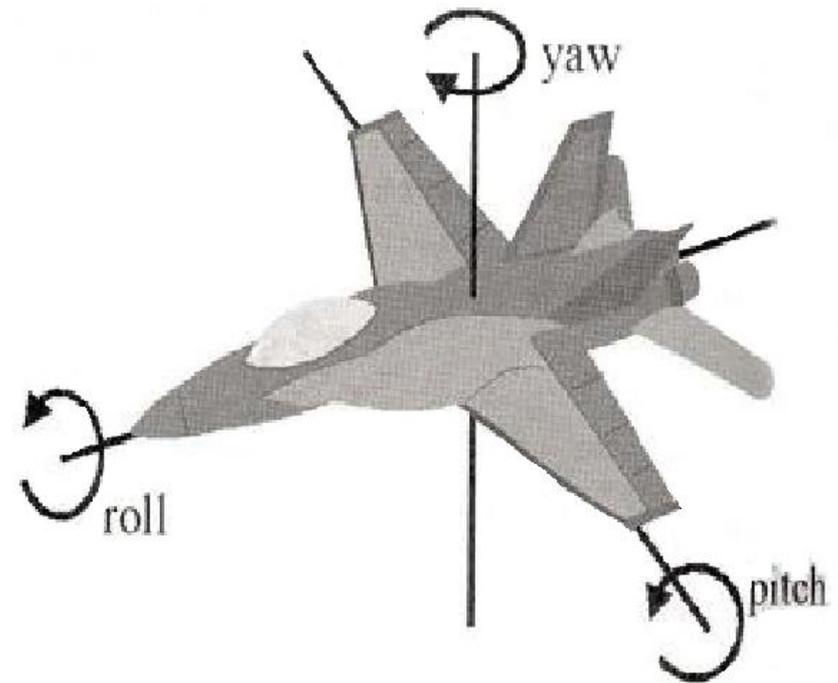
$$Q = c_Q S \frac{\rho V^2}{2}.$$

$$P = V_P - k_P \frac{\rho V_P^2}{2}.$$

Представление поворотов БПЛА через углы Эйлера

Вращение в трехмерном пространстве представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных осей связанной системы координат. Для этого используется система углов Эйлера, поворачивающих аппарат по крену, тангажу и рысканию:

- поворот на угол ϕ вокруг продольной оси Ox – крен (roll);
- поворот на угол θ вокруг поперечной оси Oz – тангаж (pitch);
- поворот на угол ψ вокруг вертикальной оси Oy – рыскание (yaw).

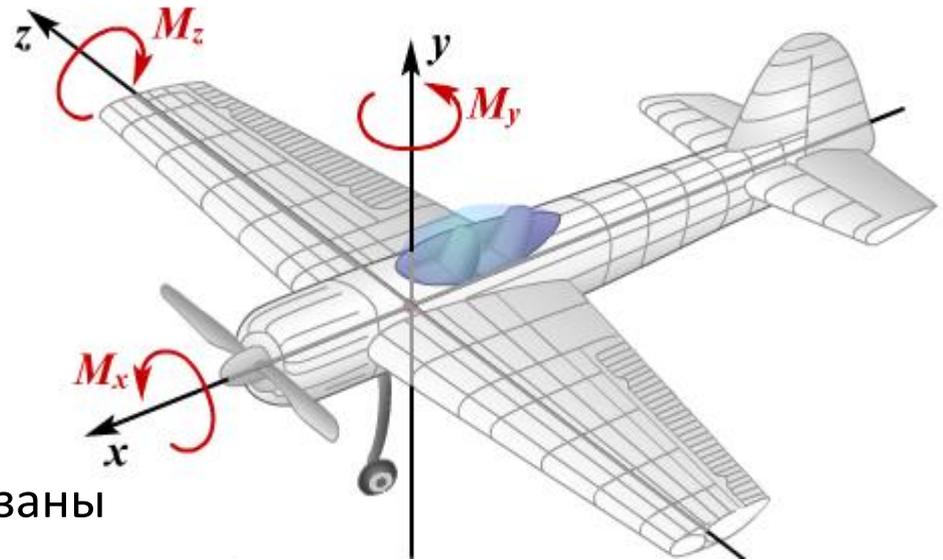


Аэродинамические моменты

$$M_x = m_x \frac{\rho V^2}{2} S l,$$
$$M_y = m_y \frac{\rho V^2}{2} S l,$$
$$M_z = m_z \frac{\rho V^2}{2} S b_a.$$

Моменты сил M и моменты инерции J исследуемого БПЛА связаны следующими соотношениями:

$$M_x = J_x \frac{d\omega_x}{dt},$$
$$M_y = J_y \frac{d\omega_y}{dt},$$
$$M_z = J_z \frac{d\omega_z}{dt},$$



Моделирование управляющих поверхностей

Элевоны исследуемого летательного аппарата сочетают в себе функции управляющих поверхностей самолётов традиционной схемы: элеронов, руля высоты и стабилизатора. Чтобы использовать классическую самолётную систему с тремя каналами управления (roll, pitch, yaw), произведен пересчет к отклонениям соответствующего элевона.

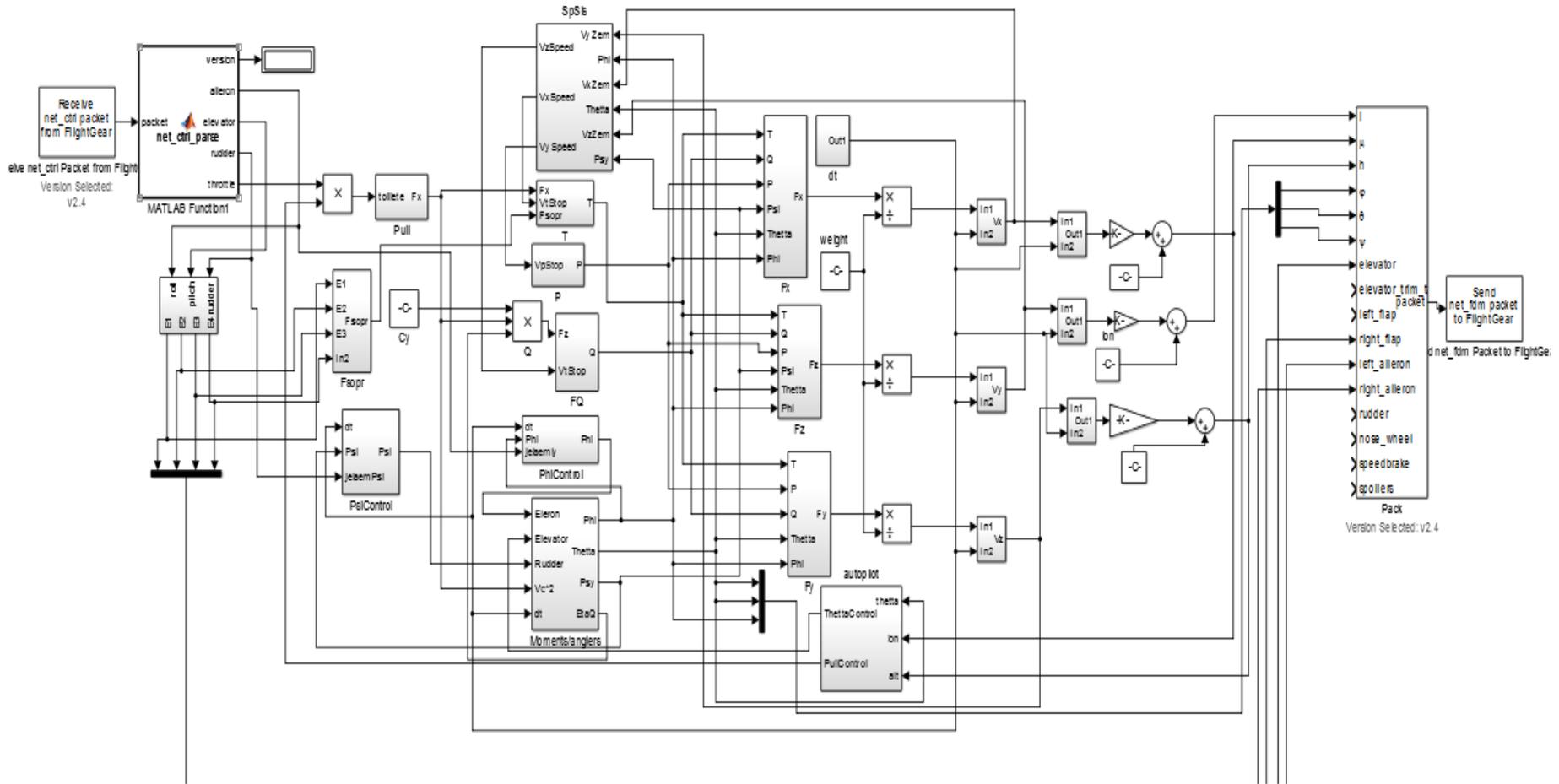
$$elevon_1 = roll - pitch + yaw,$$

$$elevon_2 = roll + pitch + yaw,$$

$$elevon_3 = roll - pitch - yaw,$$

$$elevon_4 = roll + pitch - yaw,$$

Общий вид модели



Система управления БПЛА в режиме «зависание»

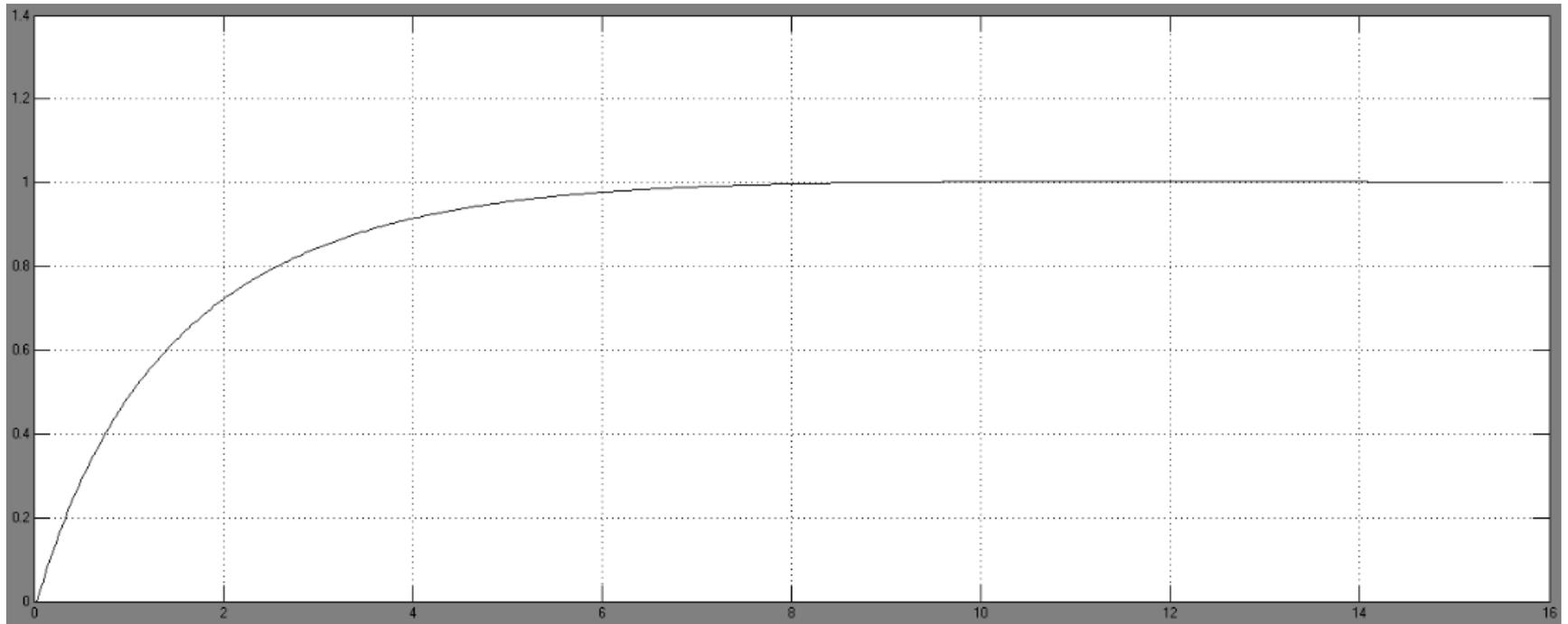
Для управления исследуемым БПЛА в режиме «зависание» необходимо осуществлять регулирование четырёх параметров: углов крена, тангажа, рыскания и высоты полёта.

Использованы ПИД регуляторы для контроля углов тангажа, крена, рыскания и пропорциональный регулятор для контроля тяги двигателя.

В соответствии с выбранным типом переходного процесса коэффициенты ПИД регуляторов рассчитаны методом биномиального разложения.

Пример переходного процесса

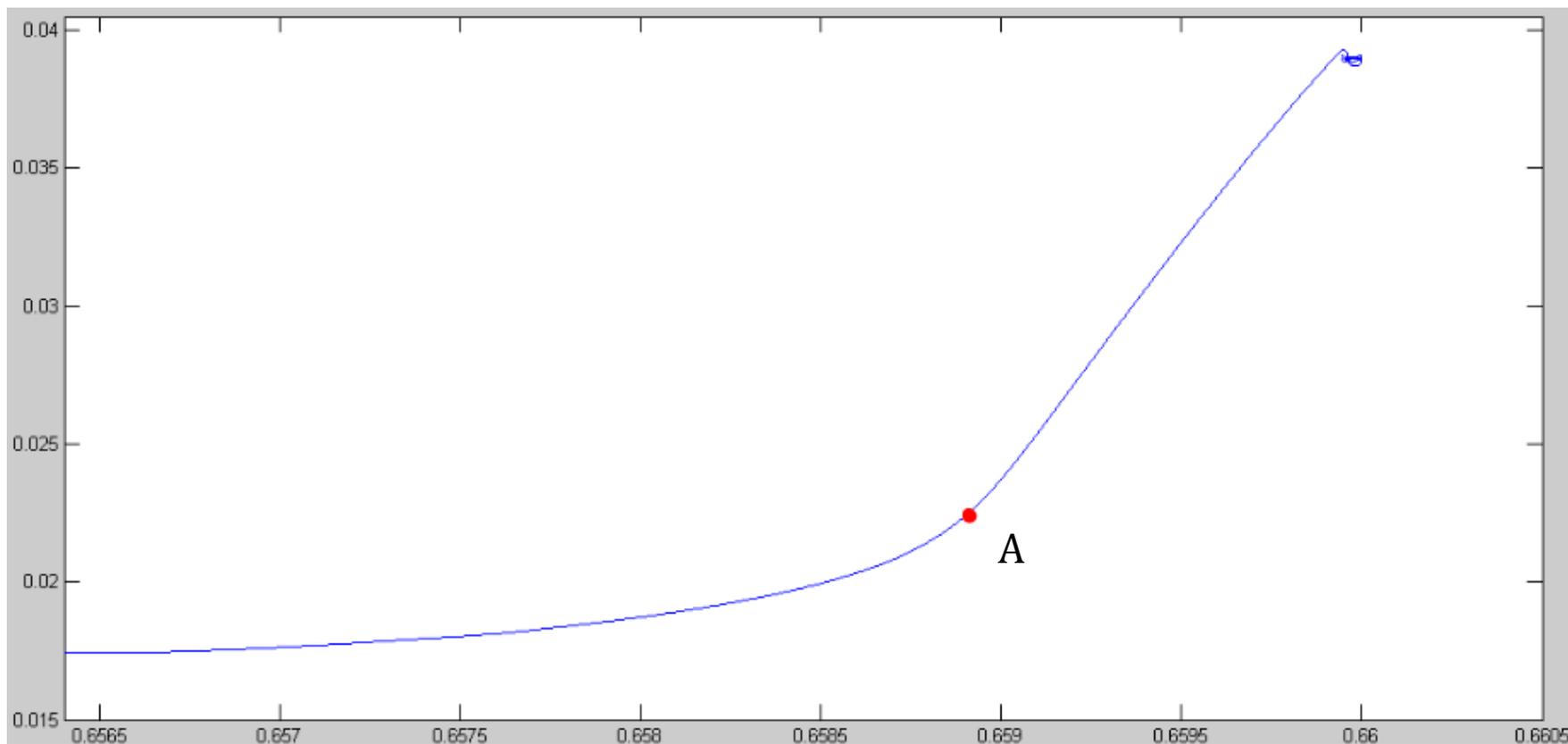
На рисунке показан переходный процесс при управлении углом рыскания (при максимальном отклонении от вертикального положения).



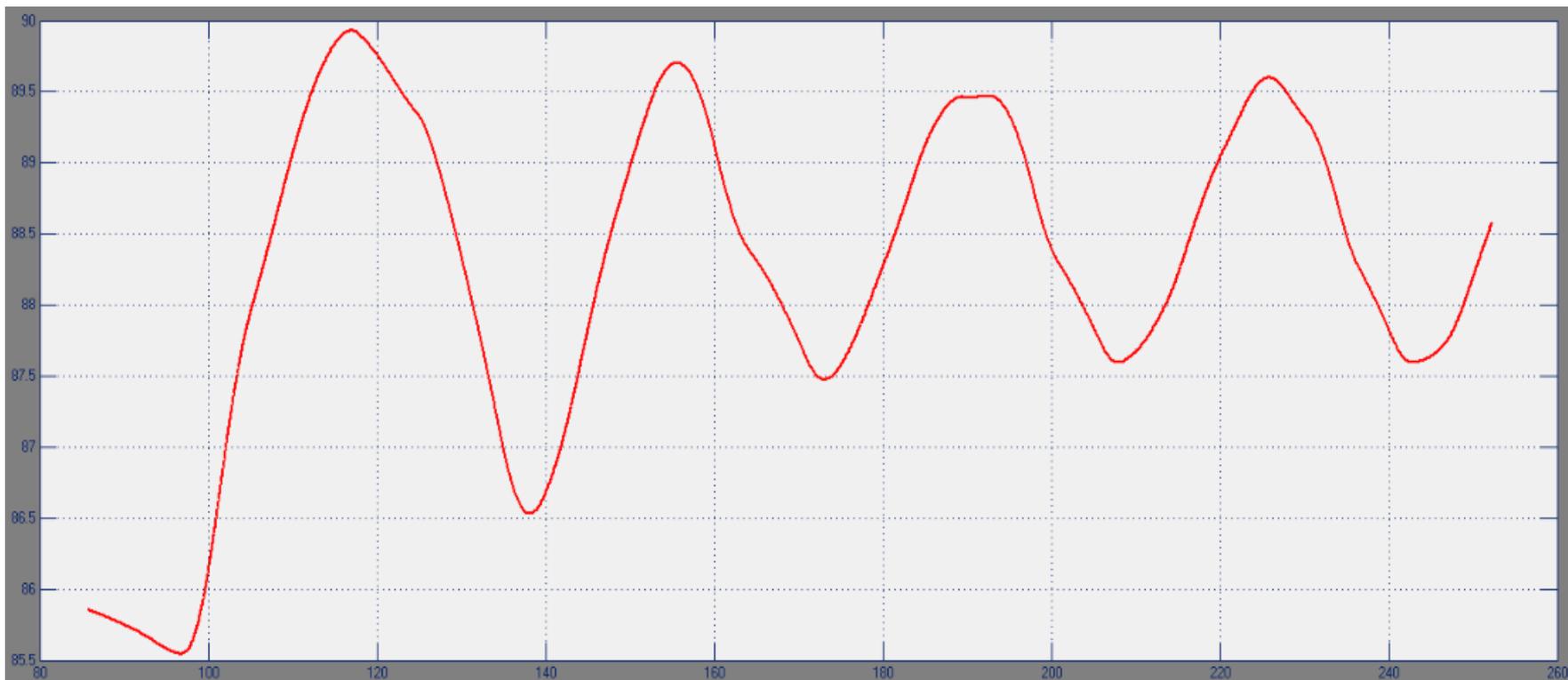
Горизонтальная шкала – время переходного процесса,
вертикальная – уставка.

Моделирование режима «зависание»

Рассмотрен случай движения БПЛА в вертикальной плоскости.
Уставка углов крена и рыскания равна нулю.



Изменение угла тангажа в режиме «зависание»



Итоги

- построена математическая модель исследуемого БПЛА
- разработана упрощенная модель вертикального взлета в среде JSBSim, визуализация полёта выполнена в авиасимуляторе FlightGear;
- разработана расширенная модель БПЛА в MATLAB Simulink с учётом основных сил и моментов, действующих на аппарат. Управлять разработанной моделью можно как ручном, так и в автоматическом режимах;
- разработана система автоматического управления БПЛА в режиме «зависание».

Конференции и публикации

Работа представлена на Международной научной студенческой конференции (МНСК) 2012. Награждена дипломом первой степени.

Статья «Разработка динамической модели беспилотного летательного аппарата» опубликована в научном журнале «Вестник НГУ»



Благодарю за внимание

Аэродинамические силы (1)

В системе координат OXZY вдоль продольной оси аппарата OX действует сила T.

$$T = F_{\text{тяги}} - G \cos(\theta) - F_{\text{соп}},$$

где

$$F_{\text{соп}} = (k_T S + S_1 \sin(\gamma_1) + S_2 \sin(\gamma_2) + S_3 \sin(\gamma_3) + S_4 \sin(\gamma_4)) \frac{\rho V^2}{2},$$

где k_T – коэффициент лобового сопротивления;

S – площадь крыла;

S_1, S_2, S_3, S_4 – площади элеронов;

$\sin(\gamma_i)$ – углы отклонения элеронов;

$\frac{\rho V^2}{2}$ – скоростной напор воздушного потока (q).

Аэродинамические силы (2)

Подъемная сила крыла Q возникает при появлении набегающего потока и в вертикальном положении стремится опрокинуть самолет.

$$Q = c_Q S \frac{\rho V^2}{2},$$

где c_Q — коэффициент подъёмной силы.

Вдоль оси OZ на летательный аппарат действует сила P

$$P = V_P - k_P \frac{\rho V_P^2}{2},$$

где V_P — боковая скорость;

k_P — коэффициент бокового сопротивления.

Моделирование режима «зависание» (1)

Разработан алгоритм, включающий две фазы: фазы приближения к заданной точке и фазы стабилизации вертикального положения.

Фаза приближения:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{z_0}{\sqrt{(x_0^2 + y_0^2)^2}},$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты точки зависания.

Расстояние до заданной точки определяется по формуле радиуса сферы:

$$R = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2},$$

где x_1, y_1, z_1 – координаты текущего положения ЛА.

Моделирование режима «зависание» (2)

Фаза стабилизации:

$$\theta = \theta_{\text{выч}} + \theta_{\text{навед}},$$

где $\theta_{\text{выч}}$ – вычисленное значение угла θ , необходимое для удержания стационарного положения БПЛА;

$\theta_{\text{навед}}$ – угол наведения, величина, необходимая для коррекции курса БПЛА в горизонтальной плоскости.

$$\theta_{\text{навед}} = k_{\text{навед}} \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2},$$

где $k_{\text{навед}}$ – экспериментально полученный коэффициент наведения.

Необходимая сила тяги рассчитывается по формуле:

$$P = P_3 + P_H.$$