

УДК 629.7

## Настройка модели беспилотника самолетного типа

Луговой Илья Данилович

Оглоблин Дмитрий Игоревич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для приобретения студентами навыков работы с сложными задачами управления используют модели беспилотных летающих аппаратов самолетного типа, которые отличаются многоконтурностью, нелинейностью и необходимостью адаптации к изменяющимся условиям полета, поскольку для регулировки используются линейные ПИД-регуляторы. Рассмотрена модель подобного беспилотника в Matlab (Engage) и получены результаты в виде анимации полета. Рассмотрено 6 контуров, иерархически связанных между собой, в которых использованы ПИД-регуляторы. Получены рекомендации для студентов, выполняющих курсовое проектирование, по порядку и методам ручной настройки контуров управления.

**Ключевые слова:** БПЛА, система автоматического управления, ПИД-регулятор, Simulink, Engage

**Введение.** Схема БПЛА самолетного типа, системы управления, полная математическая модель хорошо известны [1, 2], а вопросы настройки автопилотов постоянно обсуждаются в литературе [2–4].

Аэродинамические силы смоделированы для небольших углов атаки, при которых поток над крылом остается ламинарным [4].



Рис. 1. БПЛА и система управления

Модель реализована авторами в виде известного автопилота — системы управления летательным аппаратом со скриптовым описанием алгоритма в виде матлаб-функции (рис. 2). Интерес представляет алгоритм ручной настройки модели, включающей несколько вложенных контуров управления. Ручная настройка нужна для получения студентами опыта настройки многоконтурной системы управления.

Блок-математическая модель (ММ), реализована 4 блоками («Графика», «Динамика», «Силы и моменты», «Датчики») с заданными переменными состояния БПЛА (рис. 3). На вход системы подается положение управляющих поверхностей моделируемого летательного аппарата и усилие винтомоторной группы, на выходе — анимация полета БПЛА и графики всех интересующих переменных.

Блок динамики вычисляет переменные состояния, углы, координаты, линейные и угловые скорости, используя полученные на вход силы и моменты, используя 22 характеристики: заданные углы поворота элеронов и рулей высоты и направления, силу двигателя, параметры ветра и характеристики из блока динамики с предыдущей итерации.

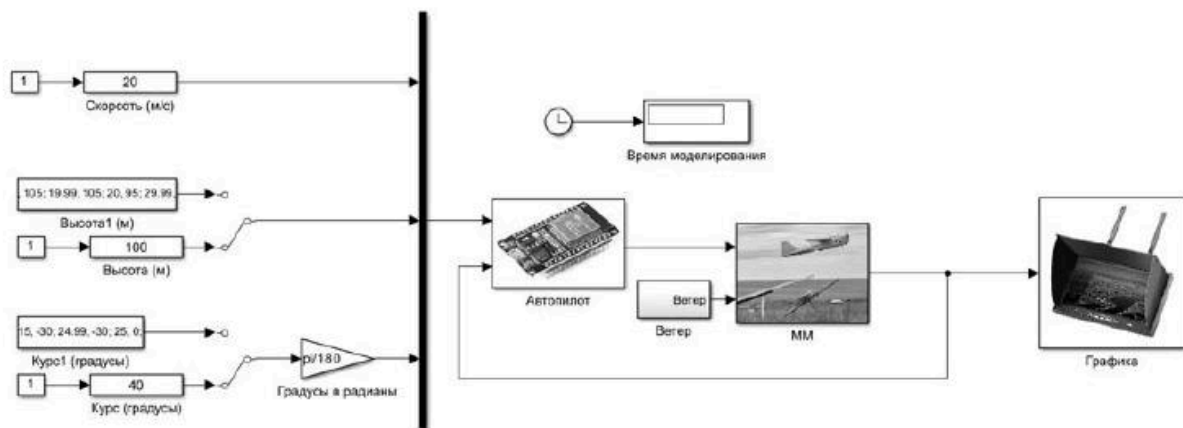


Рис. 2. Схема автопилота в Simulink

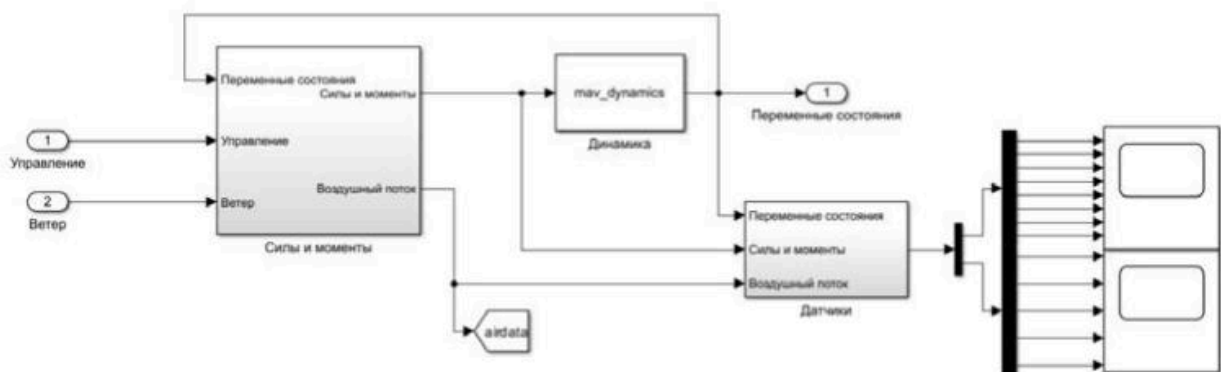


Рис. 3. Математическая модель (ММ)

**Основная часть.** В блоке ММ всего реализовано 6 контуров, которые стабилизируют ЛА в продольной и боковой плоскостях. Логика проектирования и настройки всех контуров также известна [4], в основе лежит принцип последовательного замыкания [1]: если возможно разбить передаточную функцию процесса на несколько более простых, то коэффициент усиления

внутренних контуров можно принять за единицу, если внутренний контур всегда намного быстрее внешнего и обрабатывает воздействия прежде, чем они достигнут внешнего контура.

Основные контуры, регулирующие высоту, скорость и направление полета являются относительно «медленными» и зависят от состояния «быстрых» контуров, регулирующих углы крена и тангажа. Последние должны быть быстрее частоты собственных колебаний системы по данной координате. Собственные частоты БПЛА могут быть оценены сравнением с известными образцами или рассчитаны [1, 5].

Внутренние контуры могут быть образованы последовательным включением элемента ПИД-регулятора для подчеркивания высокочастотной или низкочастотной составляющей. Например, на рис. 4 показана конфигурация контура управления продольным полетом по тангажу. Дифференциальная составляющая обрабатывает «быстрые» изменения угла и изменяет общий коэффициент передачи контура. Полоса пропускания внутреннего контура должна быть в 5–10 раз выше, чем у внешнего.

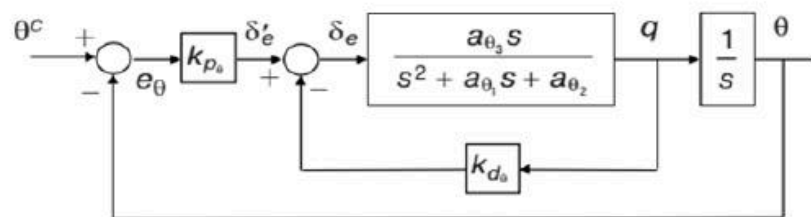


Рис. 4. Контур управления продольным полетом по тангажу

Внутренний контур на рис. 5 осуществляет настройку тангажа, а внешний поддерживает заданную высоту полета. Собственная частота передаточной функции высоты должна быть намного меньше собственной частоты контура тангажа. Также и скорость выдерживается с помощью управляющих сигналов тангажа. При этом дроссельная заслонка устанавливается на максимальное отклонение [1].

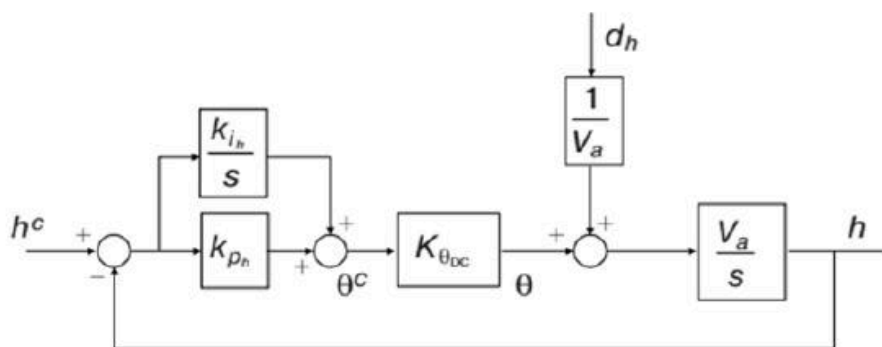


Рис. 5. Контур поддержания высоты полета путем регулирования угла тангажа

**Результаты.** Анимация позволяет визуализировать связь полета с управляющими воздействиями (рис. 6). Сначала проведена оценка устойчивого состояния. В контурах управления реализованы ПИД-регуляторы по ошибке по высоте, скорости, углу курса и боковой перегрузке. Их работа в значительной степени зависит от регуляторов крена и тангажа. Для предотвращения выхода БПЛА на закритические углы введены ограничения на выходах ПИД-регуляторов контуров по высоте, боковой перегрузке и курсу, рулевых поверхностей и дроссельной заслонки.

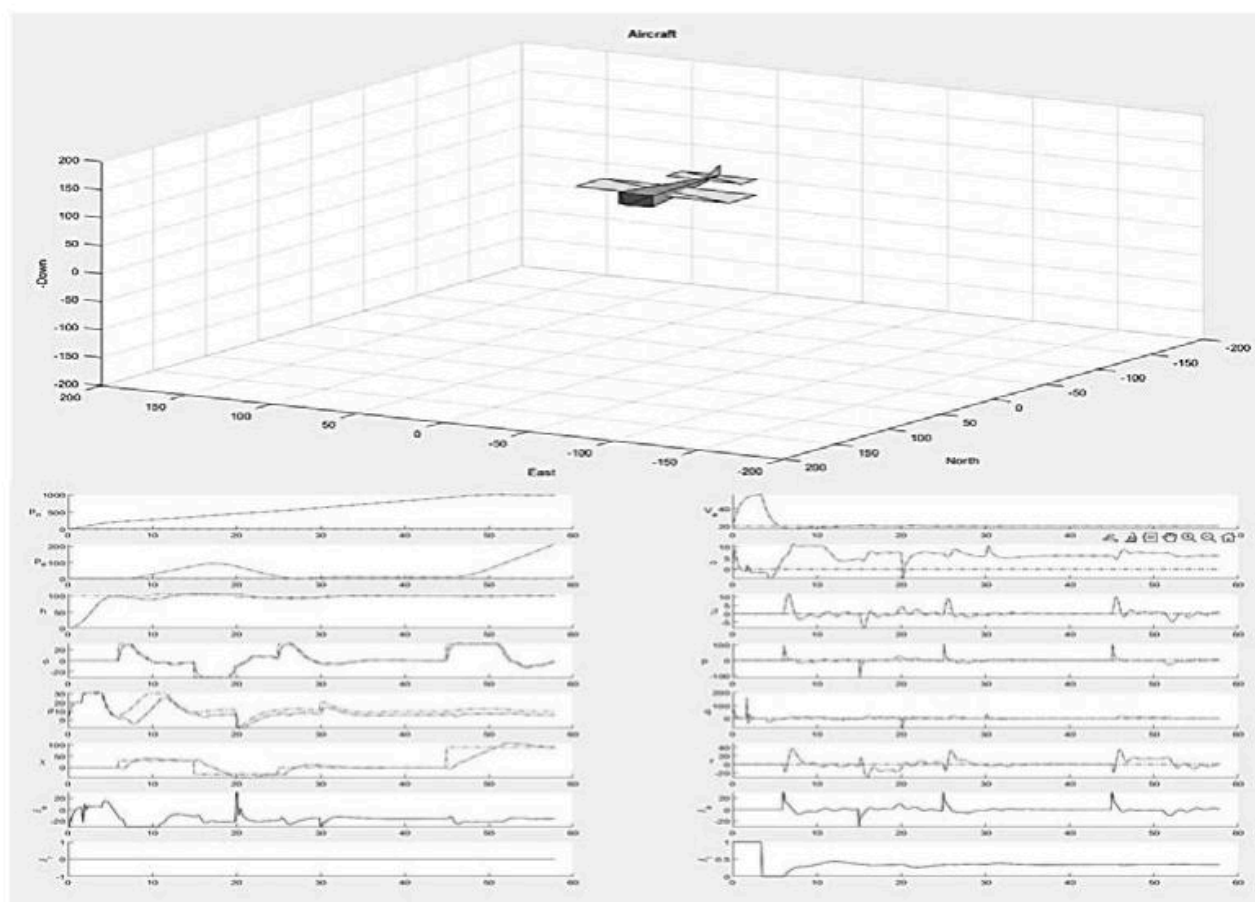


**Рис. 6.** Анимация и графики переменных состояния при анализе продольного полета

Ручная настройка заключается в предварительном назначении частот регулирования и коэффициентов внутренних контуров регулирования, исходя из физической целесообразности. Например, внутренние контура в 10 раз быстрее внешних, начальные значения  $K_p = 1$ ,  $K_d = 0$ ,  $K_i = 0$ . Играет роль и назначение контура: в быстрых контурах дифференциальная составляющая меньше, поскольку усиливает колебания. Последовательность настройки контуров управления БПЛА имеет следующий вид:

- сначала контуры крена и тангажа для достижения устойчивого состояния прямолинейного равновысотного движения. Реализовано с помощью ПИД-регуляторов;

- контуры поддержания скорости и высоты. Скорость регулируется ПИД регулятором от дроссельной заслонки с коррекцией крена и тангажа. Высота регулируется рулем с помощью жесткой обратной связи;

- потом контуры управления курсом с учетом боковой перегрузки с коррекцией крена и тангажа.

Результат многоуровневого регулирования продольного полета от угла тангажа представлен на рис. 7. По сравнению с предыдущим состоянием (рис. 6) отмечается устойчивость и достижение заданных параметров.

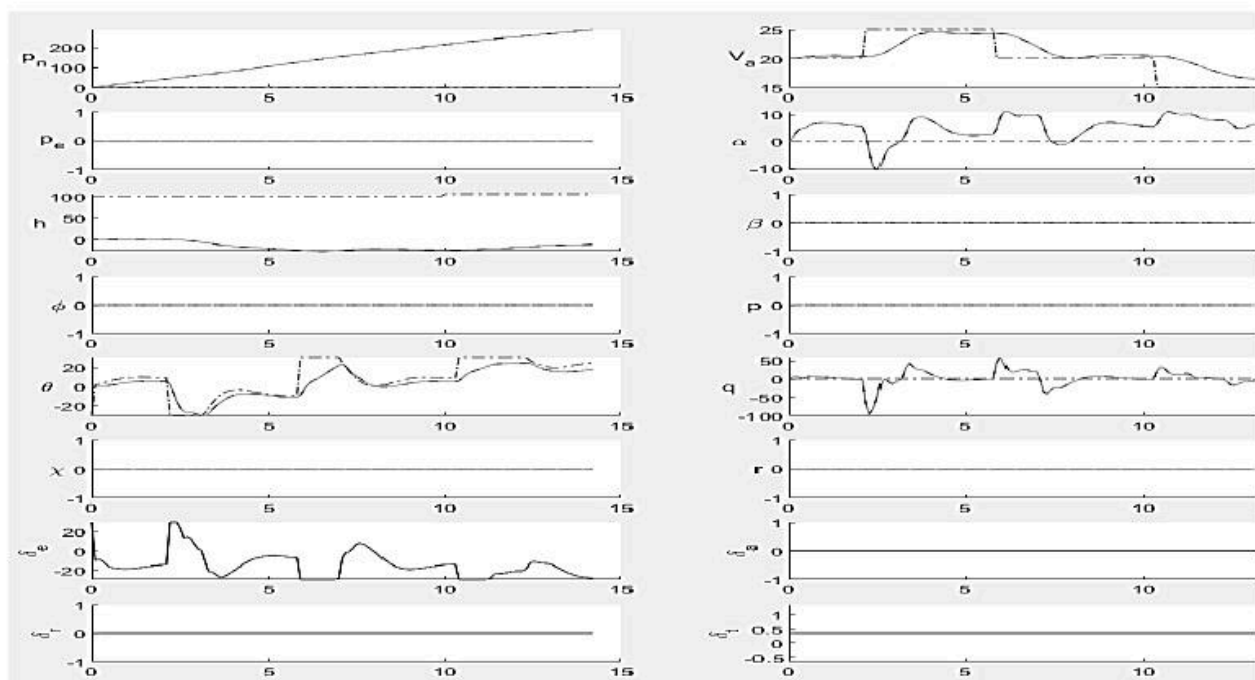


Рис. 7. Результат регулировки продольного движения БПЛА

В связи с большим количеством контуров и сложностью ручной настройки целесообразно задавать модель, делить задачу регулировки на составляющие и выдавать задания студентам на отдельные регулировки. При этом сводить все результаты в общую задачу управления заданным маневром модели.

Рекомендации по настройке.

- 1) Проверка математической модели. Проверить корректность расчета аэродинамики: реакцию на отклонение рулей, реакцию на критические углы атаки. Убедиться, что при отсутствии внешних возмущений возможно привести систему в состояние покоя.

- 2) Проверить корректность расчета динамики — при подаче на вход силы или момента по одной из осей ЛА начинает поступательное движение или вращение, соответственно.

- 3) Поочередно настраивать контуры при условии отключения остальных. Сначала по одному, затем по два и т. д.

- 4) Настраиваются сначала внутренние, затем внешние. Полоса пропускания у внешних контуров должна быть в 5–10 раз меньше. Ввод нелинейности

в виде насыщения для учета физических ограничений рулей и опасных углов наклона. При переходе на следующий уровень обращать внимание на результат совместного регулирования внешнего и внутреннего контуров.

**Заключение.** В работе приведены рекомендации студентам при выполнении домашних заданий и курсовых проектов, включающих ручную настройку многоуровневой системы управления БПЛА. Рекомендации затрагивают выбор частот регулирования и порядка настройки ПИД исходя из физики работы контура.

## Литература

- [1] Рэндал У.Б., Тимоти У.М. *Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика*. Москва, Техносфера, 2012, 312 с.
- [2] Кошкина А.А., Масленников А.Л., Бабенко М.Д., Чулин Н.А. Настройка контуров управления беспилотного воздушного судна самолетного типа с использованием генетического алгоритма. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 2. EDN: VUIMBS
- [3] Арефин В.В., Походенко М.В., Ким Н.В., Бодунков Н.Е. Адаптивная настройка автопилота беспилотного летательного аппарата. *Навигация и управление летательными аппаратами*, 2024, вып.47, с. 1–17.
- [4] *Модель БПЛА с пилотажно-навигационным комплексом*. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/nelineynaya-model-bpla-s-pilotazhno-navigatsionnym-kompleksom181> (дата обращения 20.05.2025).
- [5] Парафесь С.Г. О корректировании расчетной динамической схемы БПЛА по результатам модальных испытаний в задачах аэроупругости. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2022, т. 25, № 3, с. 73–85.

## Setting up a model of an aircraft - type drone

Lugovoy Ilia Danilovich

Ogloblin Dmitry Igorevich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

To acquire students' skills in working with complex control problems, models of unmanned aerial vehicles of the aircraft type are used, which are characterized by multi-loop, nonlinearity and the need to adapt to changing flight conditions, since linear PID controllers are used for regulation. The paper considers a model of such a drone in Matlab (Engage) and obtains results in the form of a flight animation. Six circuits, hierarchically connected to each other, in which PID controllers are used, are considered. Recommendations for students performing course design are received on the order and methods of manual adjustment of control circuits.

**Keywords:** UAV, automatic control system, PID controller, Simulink, Engage