

УДК 629.7

## Обучение настройке модели квадрокоптера с ПИД-регуляторами

Родькин Александр Михайлович

Ушаков Даниил Михайлович

Оглоблин Дмитрий Игоревич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*В процессе обучения студенты повторяют в Simulink (Engage) предложенную модель квадрокоптера со своими массогабаритными характеристиками и производят ее настройку методом «проб и ошибок». При этом большинство не достигает результатов по причине хаотических действий без учета целей и приоритетов. Для решения задачи настройки модели с ПИД-регуляторами предполагается дополнительно знакомить студентов с порядком настройки и особенностями применения дискретной модели.*

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

**Введение.** В работе рассмотрены настройки двух моделей квадрокоптера — упрощенной [1], в которой рассмотрено движение модели в одной плоскости и более сложной, описывающей пространственный полет [2–4]. Все модели выполнены в Simulink или Engage и для стабилизации параметров полета используются ПИД-регуляторы. Наличие работоспособной модели не дает гарантии настройки правильного движения, большинство моделей теряет устойчивость на 3–5 секунд условного полета. Студенты плохо представляют, как подойти к задаче настройки модели с несколькими ПИД-регуляторами, поэтому в работе даны рекомендации по выполнению домашнего задания, курсового проектирования, включающего модели беспилотников, настройки ПИД-регуляторов и полета по программе.

**Упрощенная модель квадрокоптера.** Упрощенная модель учитывает движение только в одной плоскости под влиянием сил тяги двух двигателей и силы тяжести. Моменты вращения винтов, ветер не учитывается. Даже в таком варианте модель достаточно сложна и содержит три контура управления — по углу, высоте и смещению от заданного положения (рис. 1).

Приведенная модель отличается от реального квадрокоптера увеличенной чувствительностью по углу крена вследствие отсутствия гироскопического эффекта двигателей с пропеллерами, вследствие чего легко переворачивается и падает. На рис. 2 представлены результаты регулирования контуров, а на рис. 3 — достигнутые переходные процессы по координатам.

Рекомендации по настройке.

– настройка контуров регулирования производится последовательно, от быстрых к медленным. В настраиваемом контуре устанавливается начальная ошибка, в остальных ошибки убираются;

- вращательное движение по крену — время регулирования  $\sim 0,1\text{--}1,0$  с;
- горизонтальное движение есть следствие отклонения по углу, время регулирования от  $\sim 0,5\text{--}5,0$  с;
- вертикальное движение рассчитывается при стабилизированном угле — время регулирования в диапазоне  $\sim 1\text{--}10$  с. Для первого приближения можно взять следующие отношения коэффициентов:  $K_p$  больше  $K_d$  на порядок и  $K_d$  больше  $K_i$  на порядок;
- причины потери устойчивости квадрокоптера: колебательная — чрезмерно большие коэффициенты  $K_p$  и  $K_i$ ; неколебательная — неверный знак ошибки или подключения ПИД-регулятора.

Эти рекомендации хорошо согласуются с результатами автоматической настройки, продемонстрированной в работе [5].

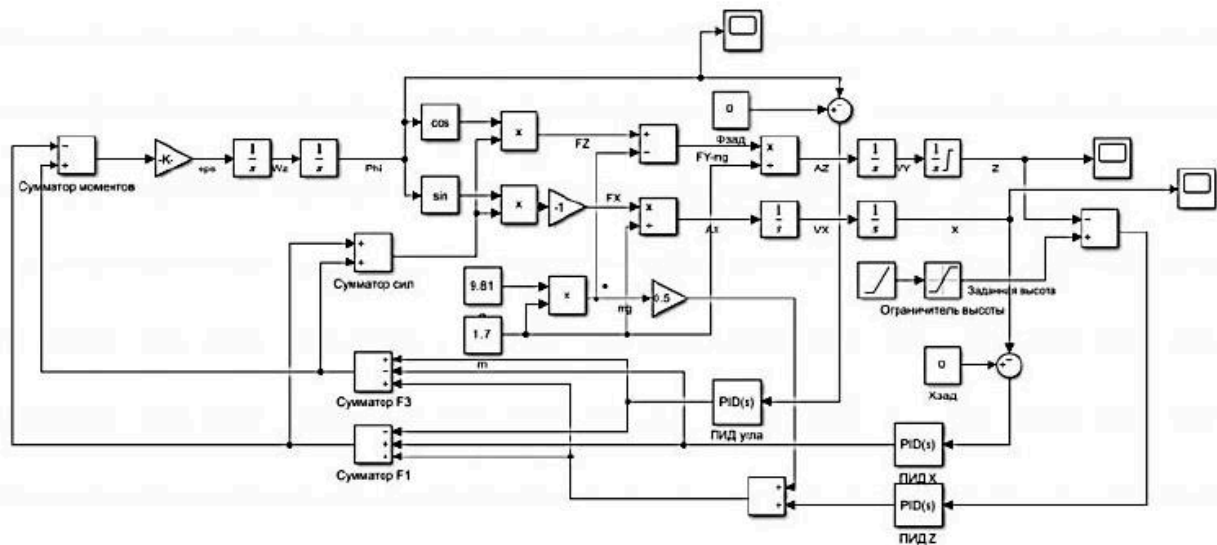
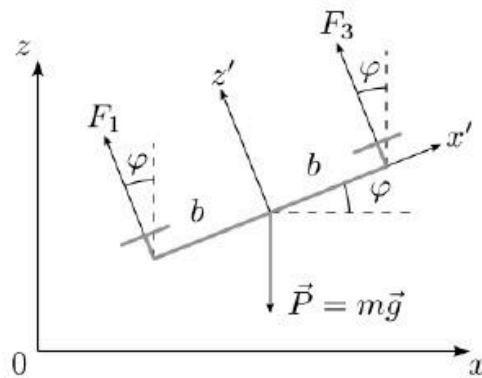


Рис. 1. Упрощенная модель и схема в Simulink

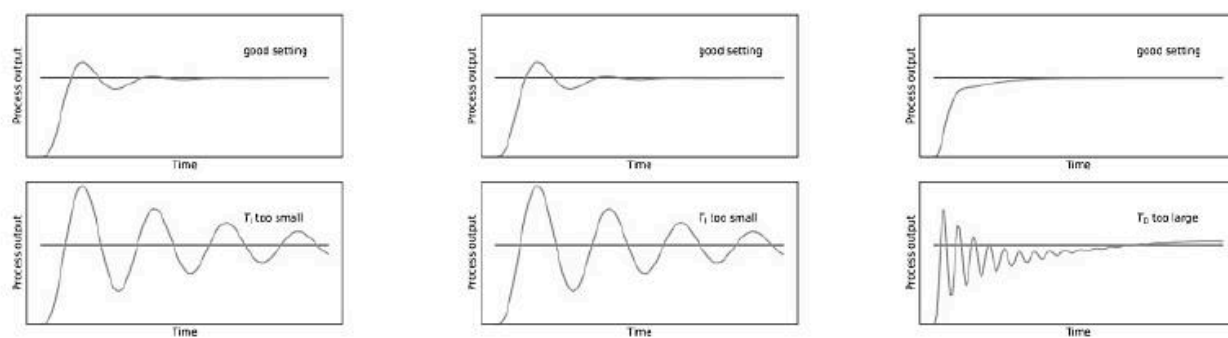


Рис. 2. Результаты регулирования по  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ :  
сверху — удовлетворительные, снизу — не удовлетворительные

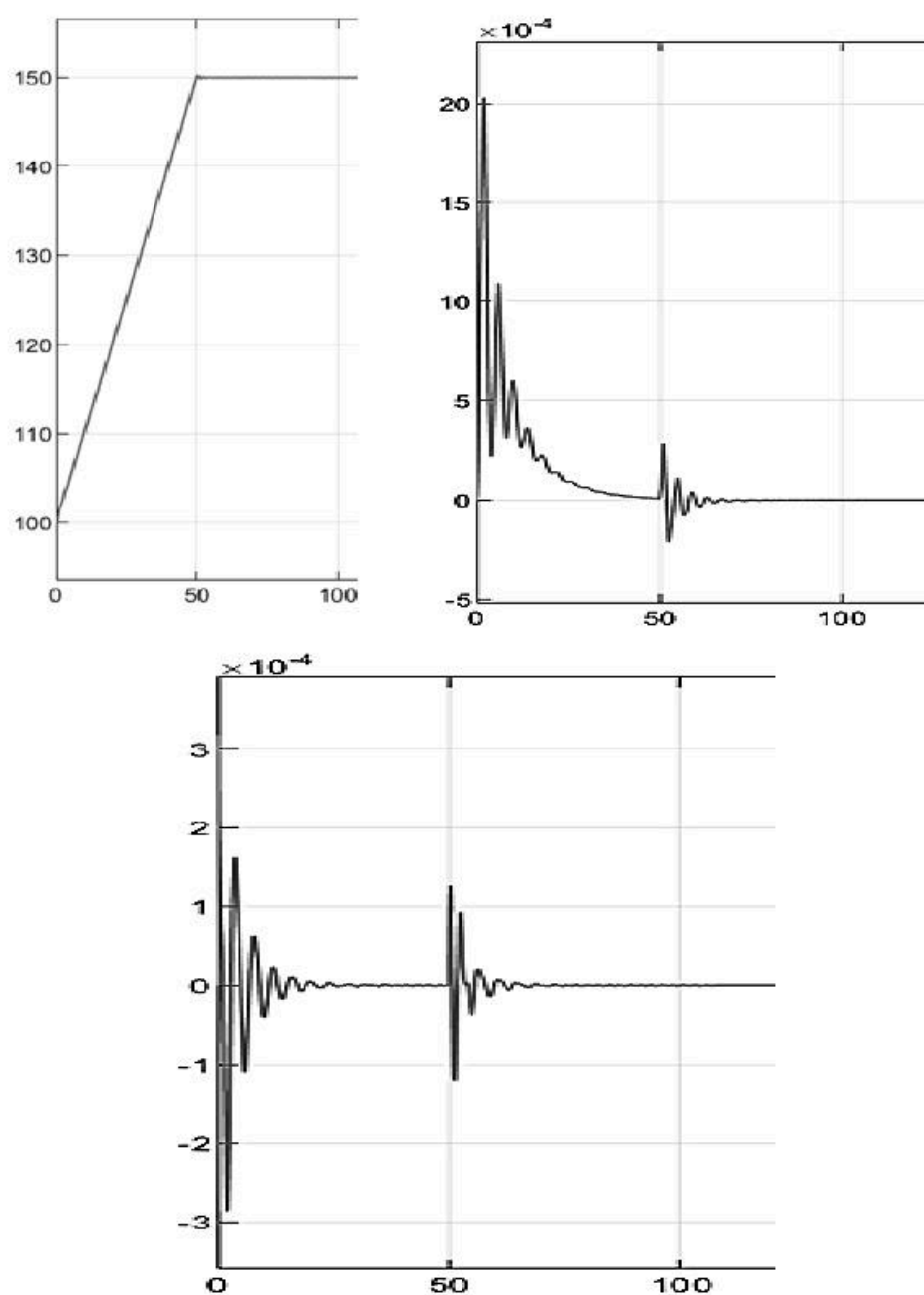


Рис. 3. Переходные процессы по координатам  $Z$ ,  $X$ ,  $\varphi$  при удачном подборе параметров

**Подробная модель квадрокоптера.** Более подробная математическая модель квадрокоптера имеет отдельную подсистему для винтомоторной группы. Один из вариантов представления такой модели — использование вектора состояния квадрокоптера [2] с компонентами:  $(x, y, z)$  — положение центра масс аппарата в инерциальной системе отсчета;  $(\varphi, \theta, \psi)$  — углы Эйлера, определяющие ориентацию квадрокоптера в пространстве [3].

В модели учтены такие факторы, как аэродинамические силы тяги несущих винтов; силы тяжести корпуса и винтов; гироскопические моменты двигателей; моменты сопротивления вращению винтов; силы сопротивления движению корпуса квадрокоптера в воздушной среде; движение воздуха относительно корпуса квадрокоптера (возмущающее воздействие); различие двигателей. Математическая модель известна из работ [2, 3]. Данные и формулы для винтомоторной группы взяты из работы [4]. Рассмотренная модель представлена на рис. 4.

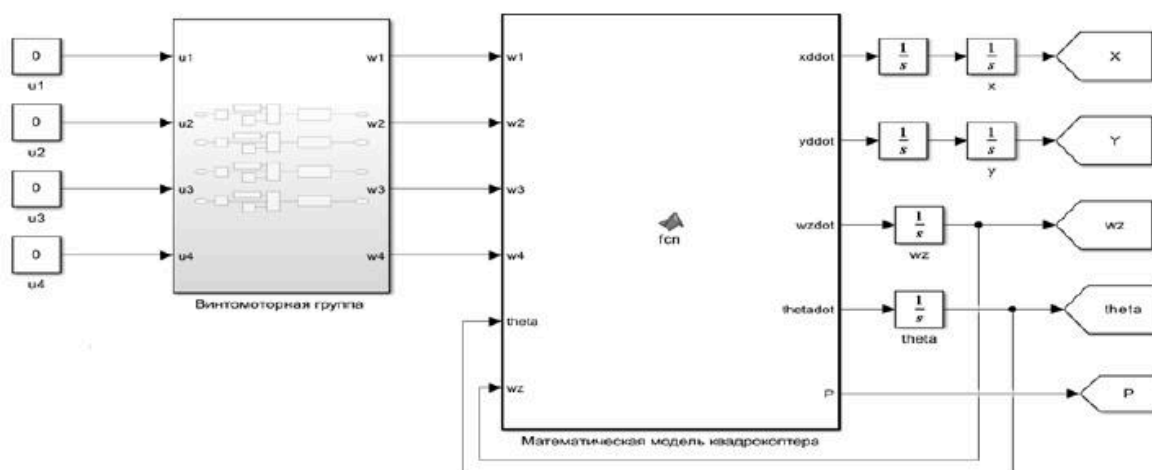


Рис. 4. Модель квадрокоптера в Simulink

Проверена адекватность математической модели при нулевых начальных условиях и отсутствии управляющих воздействий.

На рис. 5 показана система регулирования угловой стабилизации в плоскости  $XOY$ , здесь  $Y$  — вертикальная ось, при помощи корректирующих обратных связей по величине (угол тангажа) и ее производной (угловая скорость по углу тангажа). Результаты регулирования показаны на рис. 6: движение в плоскости есть результат наклона корпуса по углу тангажа.

На рис. 7 показана система траекторного управления, в которой достижение заданных координат сопровождается допустимыми изменениями углов. Первоначальная настройка двигателей может быть разная, что уводит квадрокоптер в сторону, но система отрабатывает это изменение рис. 8.

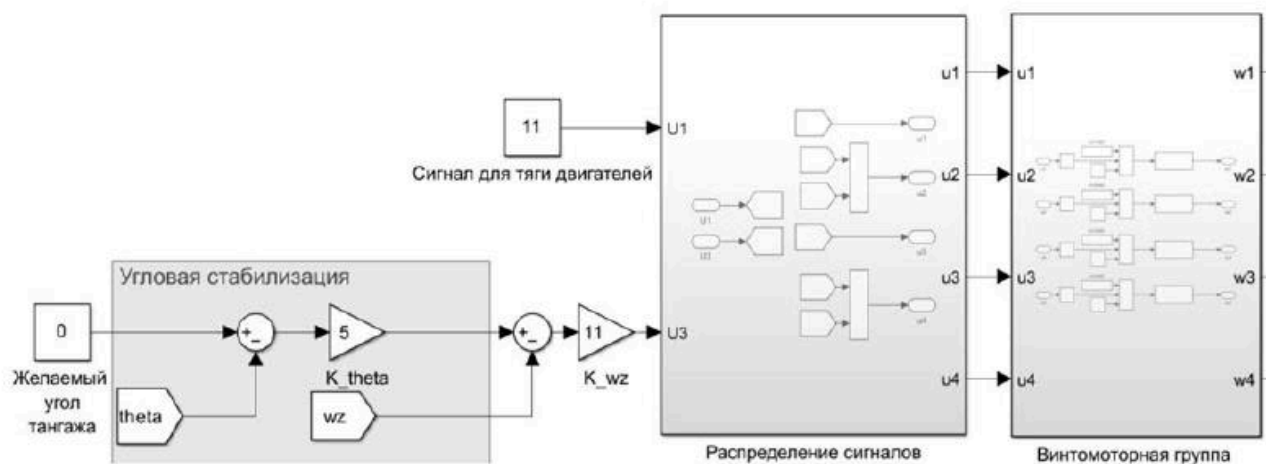


Рис. 5. Введение регулятора угловой стабилизации по тангажу. В поле подсистемы контурно изображен ее состав

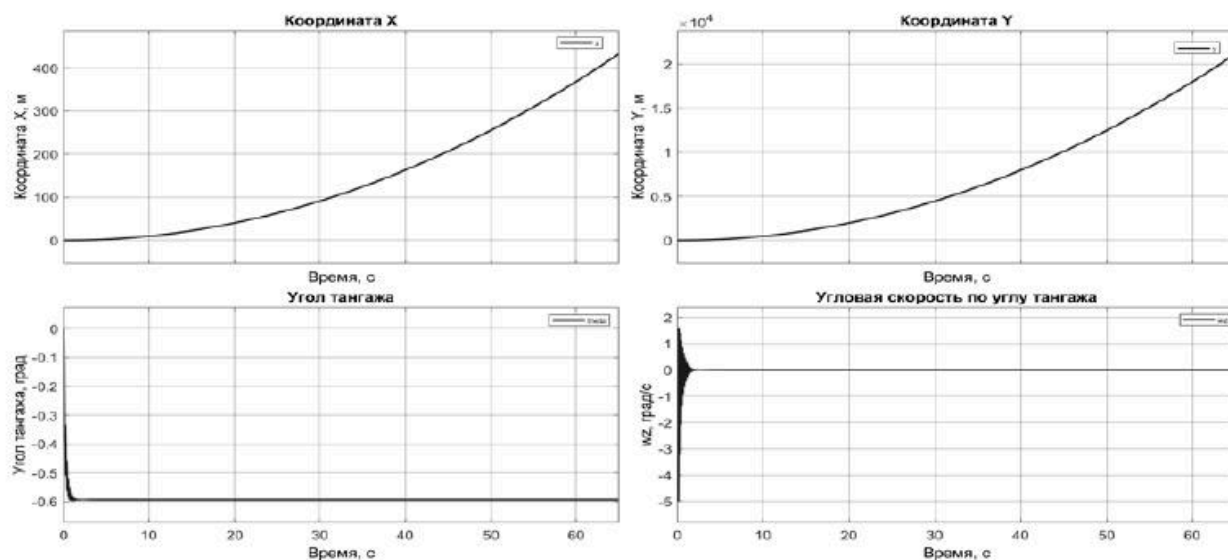


Рис. 6. Результат работы системы стабилизации по тангажу

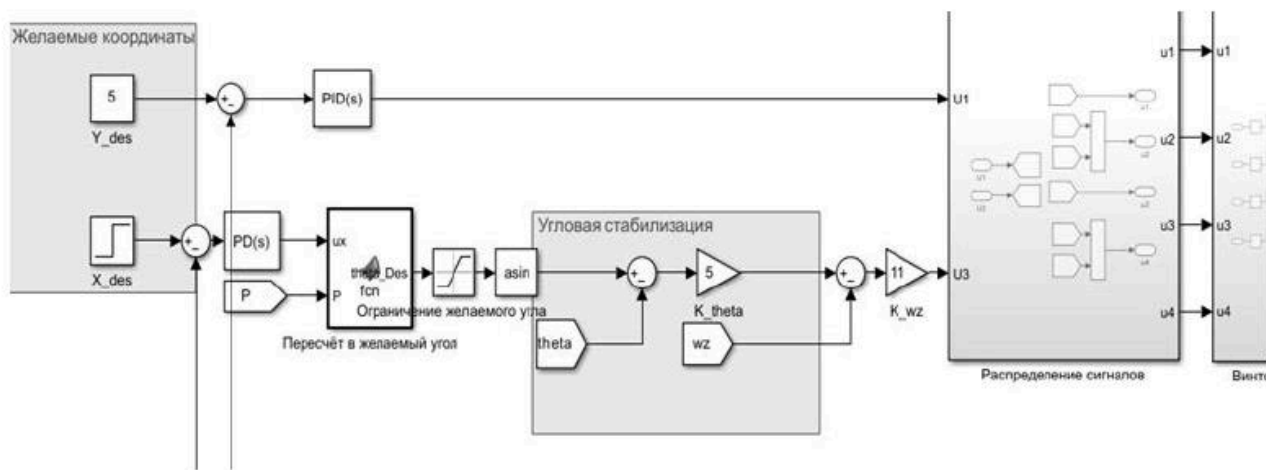


Рис. 7. Система траекторного управления

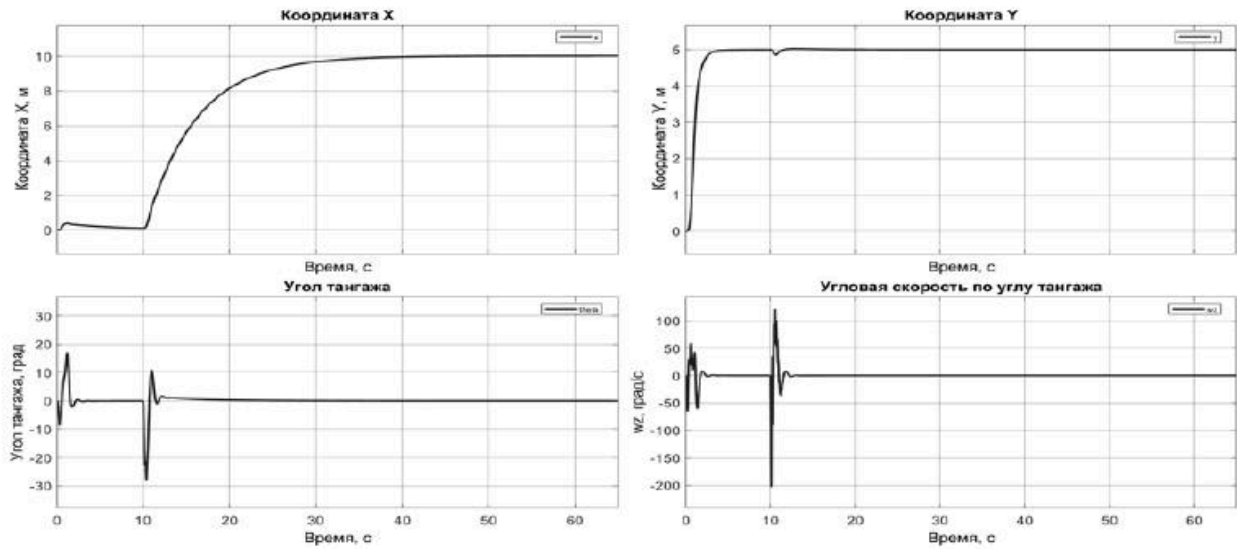


Рис. 8. Заданные координаты X, Y достигаются при допустимых изменениях углов

На рис. 9 показана схема введения продольного ветра и подсистема «Ветер». На рис. 10 показаны результаты влияния ветра на модель. При заданных внешних возмущения система удовлетворительно справляется с задачей.

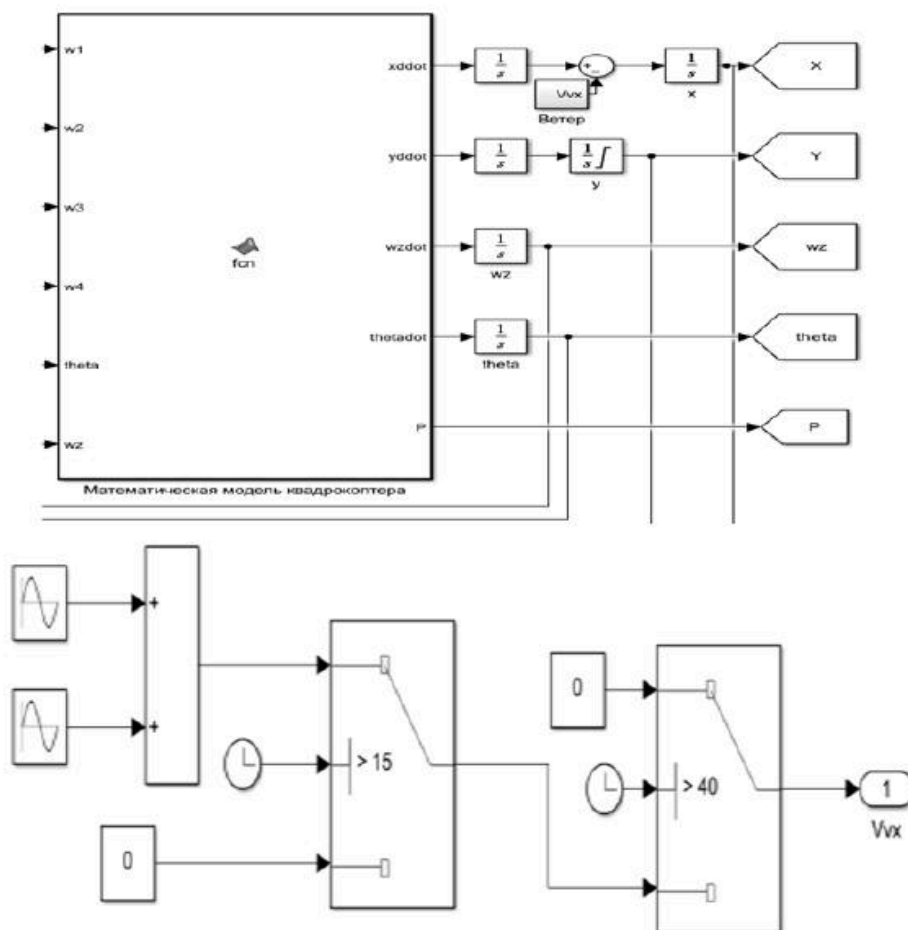


Рис. 9. Добавление ветра в модель и подсистема «Ветер»

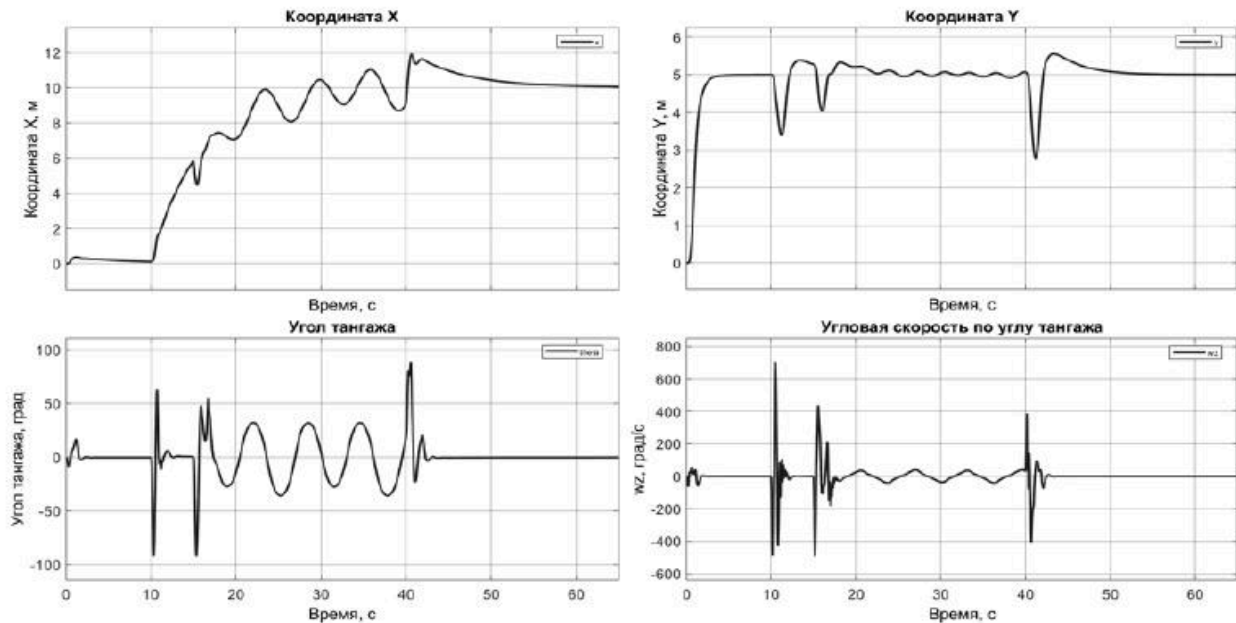


Рис. 10. Добавление ветра приводит к возможной потере устойчивости

Рекомендации для настройки контуров управления:

- проверить математическую модель при нулевых начальных условиях и нулевых внешних возмущениях;
- начинать с быстрых контуров (углового движения), изменения в которых отражаются на поведении медленных (высоты и направления). Добавлять контуры постепенно по мере отработки стабилизации;
- начинать настройку регуляторов с  $P = 1$ ,  $D = 0$ ,  $I = 0$ ;
- при наличии колебаний вводить  $D$ -составляющую регулятора;
- при необходимости добавить  $I$ -составляющую, если переходной процесс достиг какого-то установившегося значения, но не желаемого.
- несколько регуляторов создают разные сигналы, складывающиеся в управляющее воздействие и, если это управляющее воздействие имеет ограничение по величине, то система может потерять свою устойчивость. По этой причине следует соблюдать соотношение коэффициентов между несколькими регуляторами. Или внести собственные нелинейные элементы в систему, ограничивающие слишком большие по величине сигналы.

**Заключение.** В данной работе была продемонстрирована настройка системы управления квадрокоптера и предложены рекомендации по ее первичному проведению при выполнении домашних заданий и курсовых работ. Без внешних возмущений был показан хороший результат. При внешних возмущениях система удовлетворительно справляется со своей задачей. Для улучшения работы системы нужно применять каскадное включение контуров [6], при котором внутренний контур всегда намного быстрее внешнего и отрабатывает воздействия прежде, чем они достигнут внешнего контура. Также можно применять регуляторы, основанные на нечеткой логике, нейросетях или теории оптимального управления.

## Литература

- [1] Оглоблин Д.И., Трудоношин В.А. Модель квадрокоптера для лабораторных работ. *Вопросы педагогики*, 2021, № 06–2, с. 138–142.
- [2] Гэн К., Чулин Н.А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера. *Наука и Образование*, 2015, № 5, с. 218–235.
- [3] Карпунин А.А., Титков И.П. Упрощение и линеаризация математической модели движения беспилотных летательных аппаратов в пространстве и в вертикальной плоскости. *Современные наукоемкие технологии*, 2019, № 2, с. 69–77.
- [4] Чулин Н.А., Миронова И.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 9, с. 1–6.  
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1802>
- [5] Автонастройка ПИД-регулятора для UAV Quadcopter. URL: <https://docs.exponenta.ru/R2021b/slcontrol/ug/pid-controller-tuning-for-a-uav-quadcopter.html?ysclid=manqchbpm9558040094> (дата обращения 20.05.2025).
- [6] Настройка многоконтурных систем управления. URL: <https://docs.exponenta.ru/control/ug/tuningmulti-loop-control-systems.html?searchHighlight=step&yslid=masieidm9x158047068> (дата обращения 20.05.2025).

## Training in setting up a quadcopter model with pid regulators

Rodkin Aleksander Mikhailovich

Ushakov Daniil Mikhailovich

Ogloblin Dmitry Igorevich (*scientific advisor*)

*BMSTU, Moscow, Russia*

During the training, students repeat the proposed quadcopter model with its own mass and dimensional characteristics in Simulink (Engage) and configure it using the trial and error method. However, most do not achieve results due to chaotic actions without taking into account goals and priorities. To solve the problem of setting up a model with PID controllers, it is proposed to additionally familiarize students with the order of setting up and the features of using a discrete model.

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