



Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Факультет вычислительной математики и кибернетики

Кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления

Грузицкий Максим Александрович

Алгоритмы стабилизации динамической системы на примере квадрокоптера

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Научный руководитель:

профессор, д. ф-м. н.

А.В. Ильин

Москва, 2020

Оглавление

Введение	3
1. Общие сведения. Постановка задачи.	4
1.1 Математическая модель квадрокоптера	4
1.2 Постановка задачи	4
2. Описание тестируемой модели.....	6
2.1 Структура модели	6
2.2 Блок задания начальных условий.....	7
2.3 Блок контроля положения квадрокоптера.....	8
2.3.1 Стабилизация квадрокоптера	8
2.4 Блок управления смещением в пространстве	10
2.5 Блок динамики квадрокоптера	11
3. Исследование тестируемой модели.....	14
3.1 Параметры ПИД-регуляторов по умолчанию	14
3.1.1 Стабилизация модели без ограничения мощности моторов	14
3.1.2 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью одного из моторов.....	15
3.1.3 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью двух моторов.....	18
3.2 Измененные параметры ПИД-регуляторов.....	20
3.2.1 Стабилизация модели без ограничения мощности моторов	20
3.2.2 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью одного из моторов.....	23
3.2.3 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью двух моторов.....	25
Заключение	27
Список литературы	28

Введение

В работе рассматривается задача исследования поведения квадрокоптера в случае возникновения аварийной ситуации, связанной с ограничением максимальной мощности моторов.

Для моделирования поведения квадрокоптера используется готовая модель. Эксперименты осуществляются в среде MATLAB Simulink.

1. Общие сведения. Постановка задачи.

1.1 Математическая модель квадрокоптера

Квадрокоптер — это летательный аппарат с 4 моторами, расположенными на концах двух перпендикулярных осей. Винты квадрокоптера, расположенные на противоположных осях, вращаются в противоположных направлениях для компенсации крутящего момента.

Рассмотрим систему координат квадрокоптера: обобщённые координаты имеют вид $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi) \in R^6$, где (x, y, z) — положение центра массы аппарата в пространстве. Угловое положение задаётся тремя углами: крена φ , тангажа θ и рыскания ψ , определяющими вращение вокруг Ox , Oy и Oz соответственно.

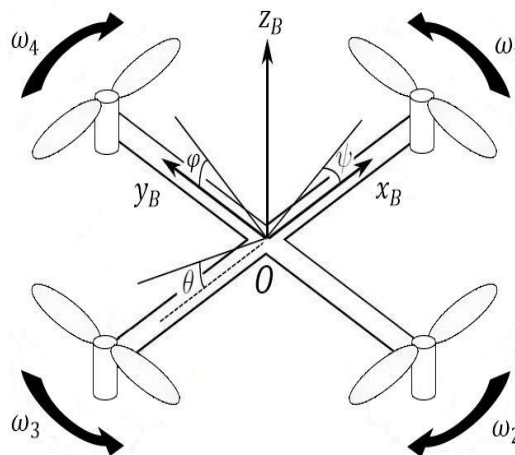


Рис. 1.1 – Система координат квадрокоптера

1.2 Постановка задачи

Во время эксплуатации модели возможны случаи непредвиденного отказа какой-либо системы или её части. В таких ситуациях необходимо понимать каким образом модель будет себя вести и как можно уменьшить негативные последствия. Одной из таких ситуаций для квадрокоптера могут быть неполадки одного или нескольких моторов, из-за которых моторы не могут развивать свою максимальную мощность. Исследуем поведение модели при возникновении такой ситуации.

В работе решаются следующие задачи:

1. Исследовать поведение квадрокоптера со стандартными настройками ПИД-регулятора (подробнее см. [2.3.1 Стабилизация квадрокоптера](#)):
 - а. при ограничении максимальной мощности одного мотора;

- b. при ограничении максимальной мощности двух противоположных моторов;
 - c. сравнить полученные результаты.
- 2. Исследовать поведение квадрокоптера с изменёнными настройками ПИД-регулятора:
 - a. при ограничении максимальной мощности одного мотора;
 - b. при ограничении максимальной мощности двух противоположных моторов;
 - c. сравнить полученные результаты.

2. Описание тестируемой модели

2.1 Структура модели

Для моделирования поведения квадрокоптера используется программный комплекс MATLAB Simulink. MATLAB — это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая строить динамические модели.

В работе используется готовая модель системы управления квадрокоптером Quadcopter Dynamic Modeling and Simulation (Quad-Sim) v1.00 созданная в 2014 году D. Hartman, K. Landis, M. Mehrer, S. Moreno, J. Kim.

Модель системы управления квадрокоптером разбита на отдельные блоки, чтобы упростить её дальнейшее использование в исследованиях:

- Блок задания начальных условий.
- Блок контроля положения квадрокоптера.
- Блок управления движением.
- Блок, описывающий динамику квадрокоптера.

Разработанная система управления представлена на рисунке 2.1.

Представленная система состоит из 4 модулей. Каждый модуль — это часть общей системы управления. Такая система управления позволяет легко взаимодействовать с ней путем быстрого доступа к каждой из её частей и, при необходимости, быстро изменить её.

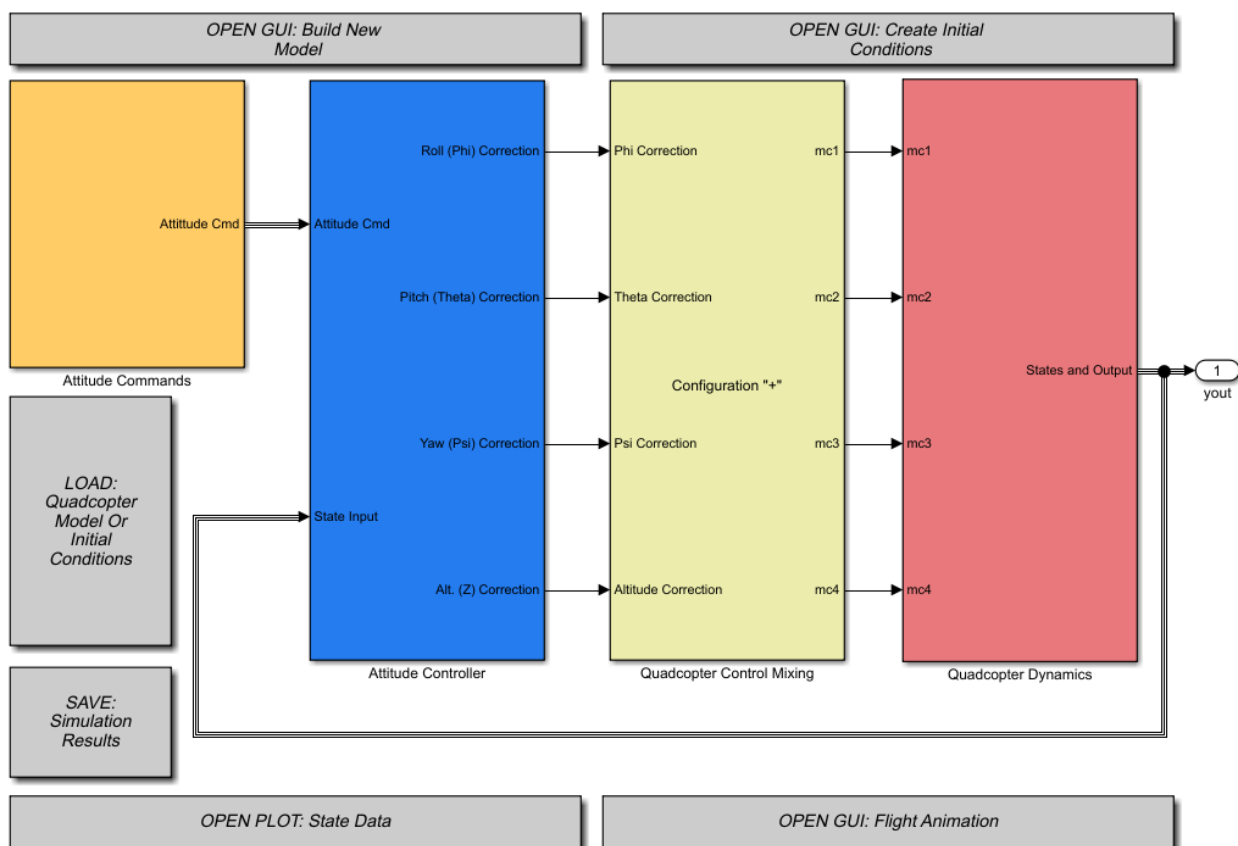


Рис. 2.1 – Модель системы управления БПЛА.

2.2 Блок задания начальных условий

В данном блоке (рис. 2.2) задается начальное положение летательного аппарата, а также задается высота, которую необходимо удерживать квадрокоптеру.

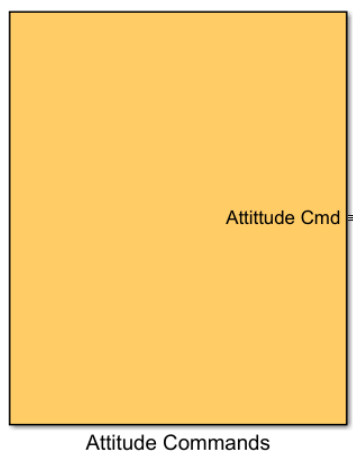


Рис. 2.2 - Блок задания начальных условий

Схему данного блока можно увидеть на рисунке 2.3. Пользователь может задать начальное положение квадрокоптера в пространстве и указать начальную высоту и высоту стабилизации.

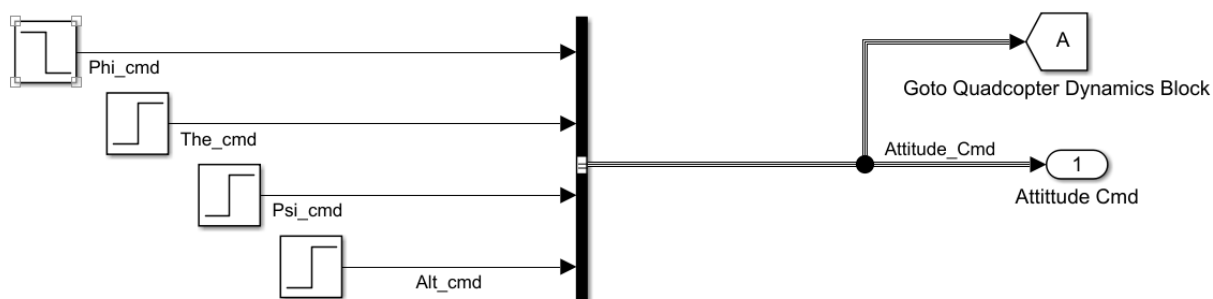


Рис. 2.3 – Структурная схема блока задания начальных условий

2.3 Блок контроля положения квадрокоптера

В данном блоке (рис. 2.4) реализован процесс корректировки движения квадрокоптера.



Рис. 2.4 – Блок контроллера положения квадрокоптера

2.3.1 Стабилизация квадрокоптера

Корректировка движения квадрокоптера происходит путем использования четырех ПИД-регуляторов, которые обеспечивают стабилизацию положения аппарата по трём плоскостям и по высоте во время полета. Первый будет стабилизировать угол крена, второй будет стабилизировать угол тангажа, третий будет стабилизировать угол рыскания,

а четвертый отвечает за стабилизацию квадрокоптера по высоте. Структурная схема блока контроля положения квадрокоптера представлена на рис. 2.5.

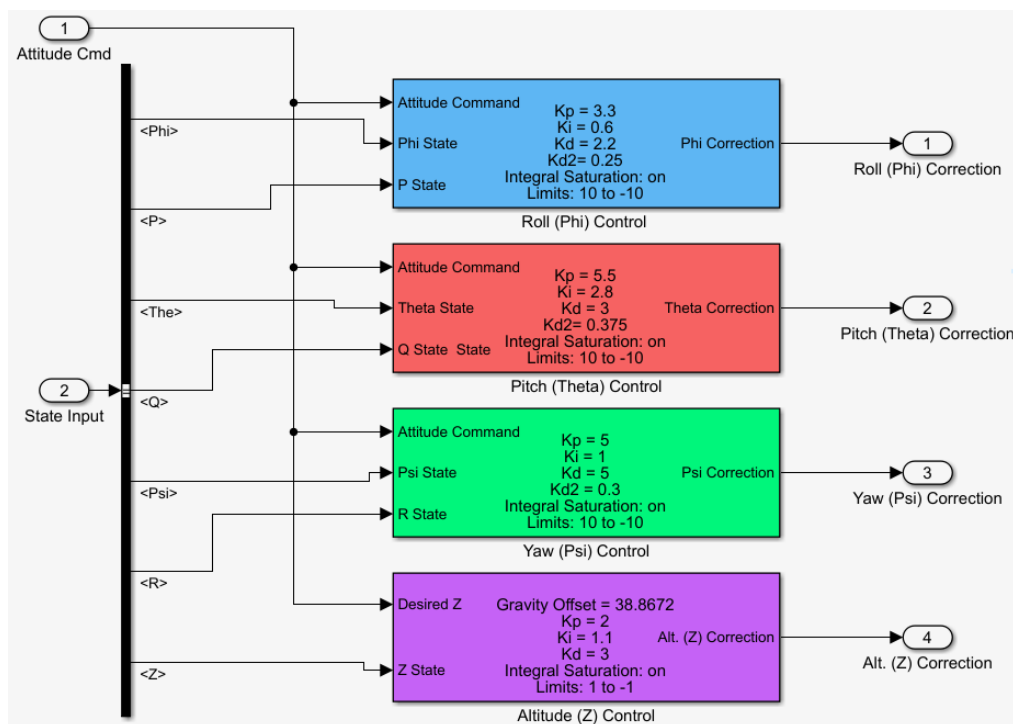


Рис. 2.5 – Структурная схема блока контроллера управления высотой

Уравнение выходного сигнала ПИД-регулятора имеет вид:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где K_p, K_i, K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора.

ПИД-регулятор встроен в систему управления квадрокоптером согласно схеме на рис. 2.6.

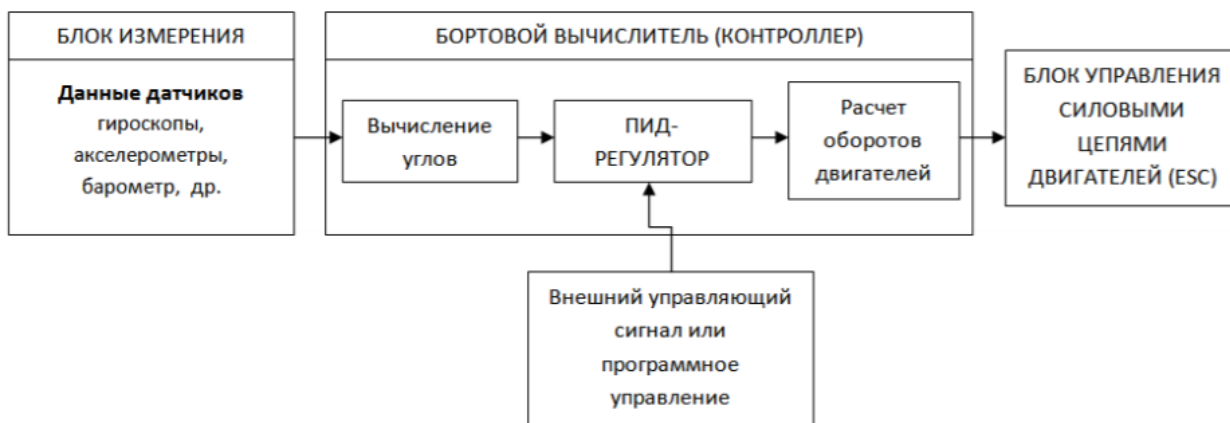


Рис. 2.6 – Схема управления двигателями

В зависимости от сценариев использования квадрокоптера следует производить различную настройку ПИД-регуляторов. Изменение параметров P , I и D по-разному влияет на поведение аппарата. Рассмотрим влияние каждой из составляющих на движение и управление квадрокоптером.

Пропорциональная составляющая P :

Увеличение значения P приводит к повышению устойчивости до тех пор, пока слишком большое значение P не приведет к потере управляемости и осцилляциям.

Уменьшение значения P снижает реакцию на управляющее воздействие.

Интегральная составляющая I :

Увеличение I способствует улучшению устойчивости и уменьшает дрейф, но также увеличивает задержку возврата в исходное положение.

Уменьшение значения I снижает скорость реакции аппарата на управляющее воздействие.

Дифференциальная составляющая D :

Увеличение значения D повышает скорость стабилизации после изменения положения аппарата в пространстве (в результате управления или внешнего воздействия).

Уменьшение D снижает скорость и размер колебаний при возврате в стабилизированное положение.

2.4 Блок управления смещением в пространстве

Данный блок принимает скорректированные параметры с регуляторов, и совмещает их для отправки на нужный ротор.

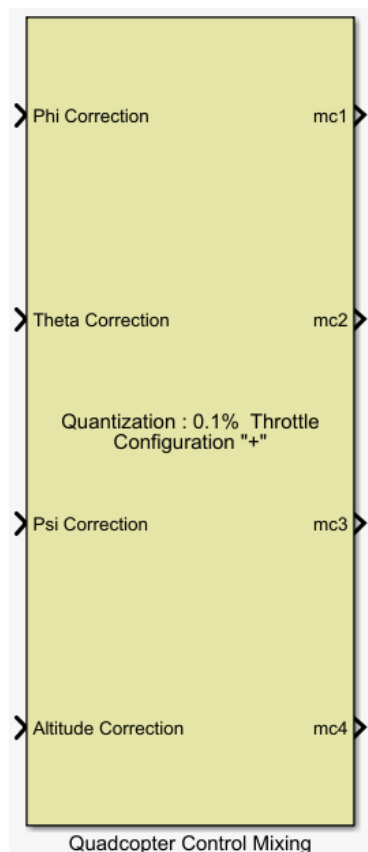


Рис. 2.7 – Блок управления смещением в пространстве

После внесения корректировок в управление роторами, данные с этого блока поступают на блок динамики квадрокоптера.

2.5 Блок динамики квадрокоптера

Блок динамики квадрокоптера (рис. 2.8) отвечает за исполнительные устройства, а именно за непосредственное управление моторами летательного аппарата.

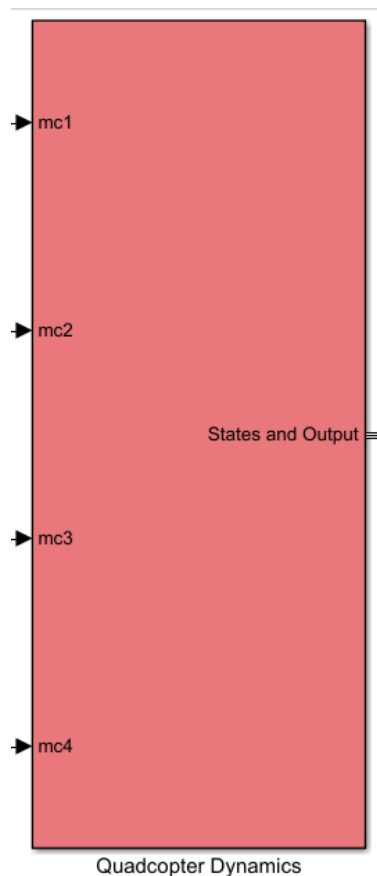


Рис. 2.8 - Блок динамики квадрокоптера

Внутри данного блока располагаются: блок динамики мотора, блок управления внешними воздействиями, блок расчета параметров модели. Структурная схема блока динамики квадрокоптера представлена на рисунке 2.9.

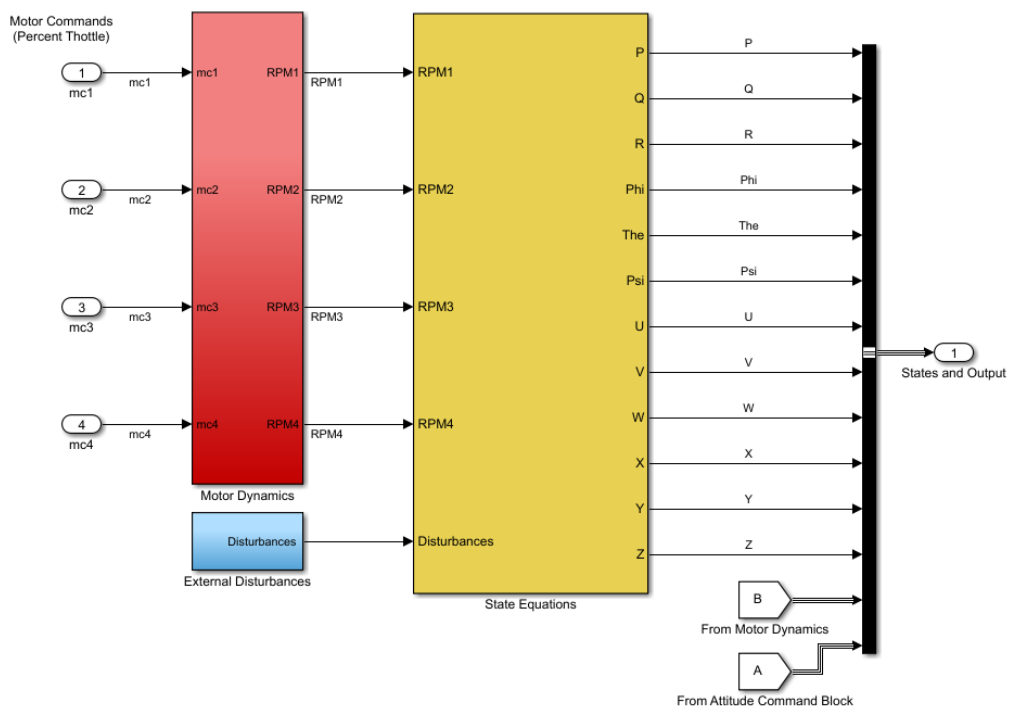


Рис. 2.9 – структурная схема блока динамики

Рассмотрим блоки, входящие в блок динамики квадрокоптера. Блок динамики моторов представляет из себя структурную схему реализации бесколлекторного мотора постоянного тока (рис. 2.10).

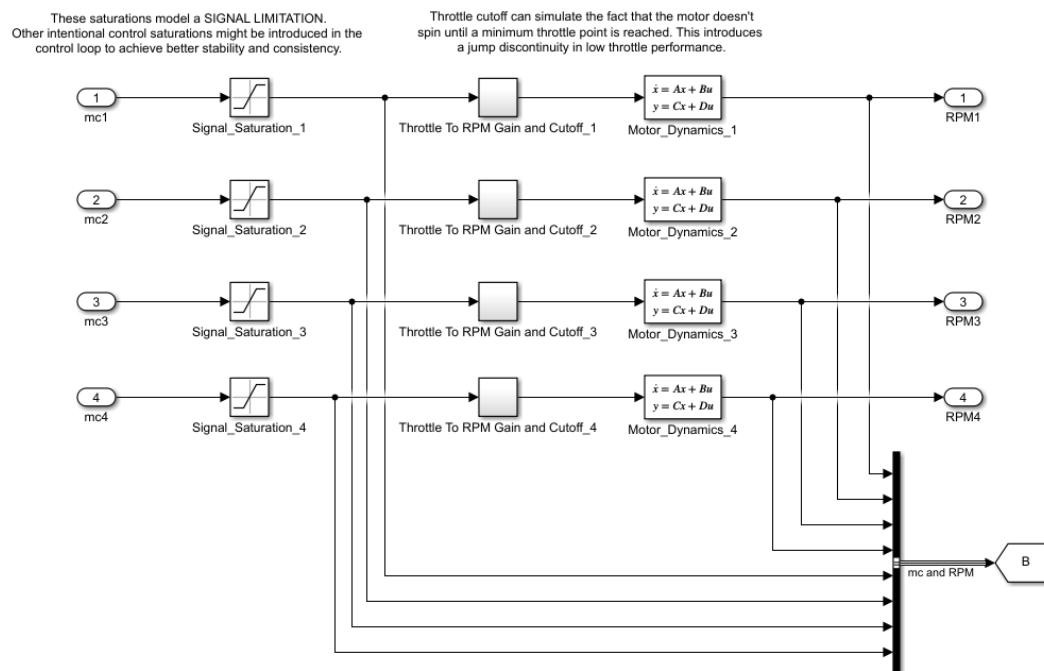


Рис. 2.10 – Структурная схема блока динамики моторов

Блоки `Signal_Saturation` используются для ограничения подаваемой на моторы мощности. По умолчанию максимальная мощности, подаваемая на двигатели ограничена 100%. В ходе проведения экспериментов ([3. Исследование тестируемой модели](#)) будет проведено изменение данных параметров.

3. Исследование тестируемой модели

Рассматривается поведение модели квадрокоптера при ограничении максимальной подаваемой мощности на один или несколько моторов с целью выявления параметров, при которых возможна стабилизация и дальнейшее движение квадрокоптера. В первой части был проведён анализ поведения аппарата со стандартными настройками ПИД – регулятора. Во второй части настройки ПИД – регулятора были изменены для достижения лучших результатов в данной задаче.

Для исследования полёта и дальнейших выводов в каждом эксперименте будем использовать графики скорости вращения моторов и положения квадрокоптера в пространстве по осям X, Y, Z.

3.1 Параметры ПИД-регуляторов по умолчанию

Квадрокоптер получает задачу подняться с земли и выполнить стабилизацию на горизонтальной оси на высоте 10.

3.1.1 Стабилизация модели без ограничения мощности моторов

Проведём моделирование полёта квадрокоптера без неполадок и выясним используемую мощность моторов, которая необходима для взлёта, успешной стабилизации и удержания постоянной высоты.

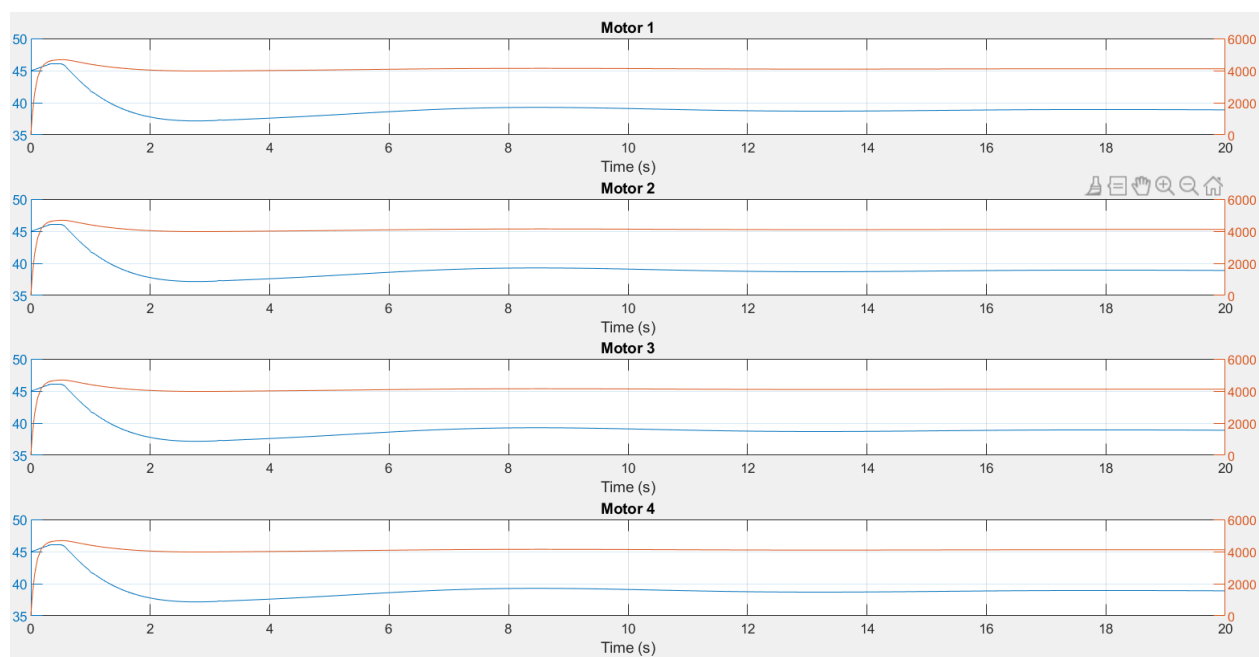


Рис. 3.1 – График мощности моторов

Из графика видно, что используемая мощность примерно равна 46%, поэтому это значение было взято базовым для дальнейших экспериментов.

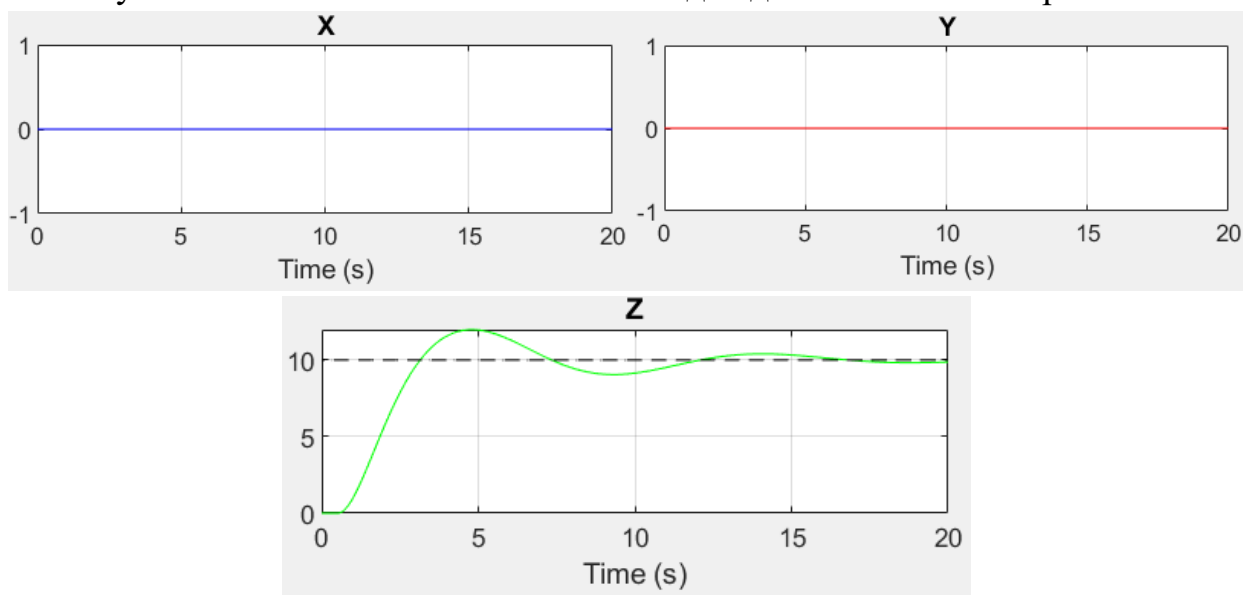


Рис. 3.2 – Графики положения в пространстве

Из графика видно, что модель удерживает необходимую высоту, равную 10.

3.1.2 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью одного из моторов

В ходе проведения экспериментов было установлено, что смещение по осям X и Y начинает происходить при выставлении ограничения 46%.

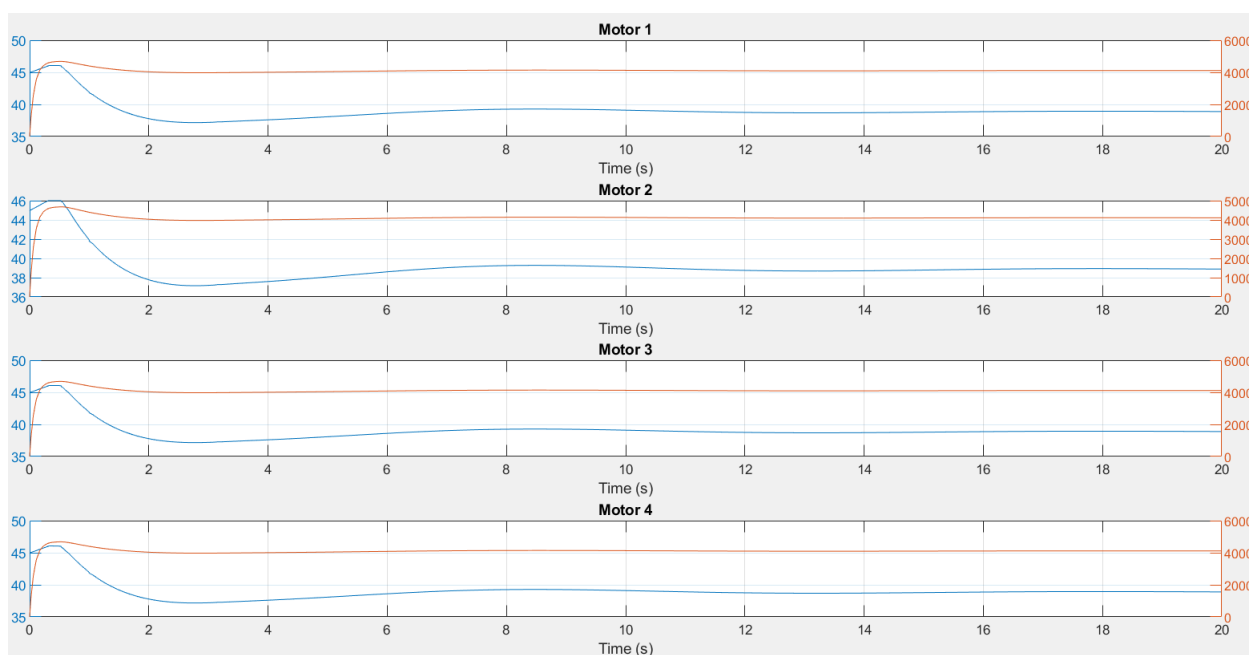


Рис. 3.3 – График мощности моторов

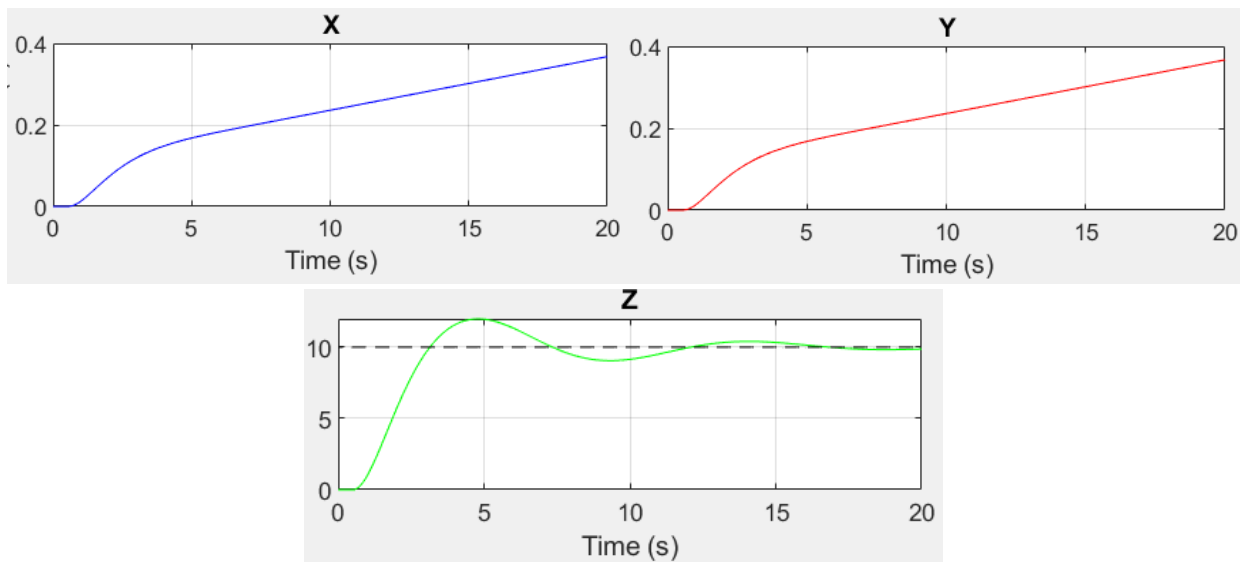


Рис. 3.4 – Графики положения в пространстве

Как видно из графика, произошло небольшое смещение по осям X и Y из-за ограничений мощности мотора. При этом смещение случилось после того, как модель произвела стабилизацию по углам наклона (3 секунда эксперимента) и стало постоянным в результате воздействия инерции.

В ходе проведения экспериментов было установлено, что максимальная мощность, при которой происходит стабилизация по высоте равна 44,2%.

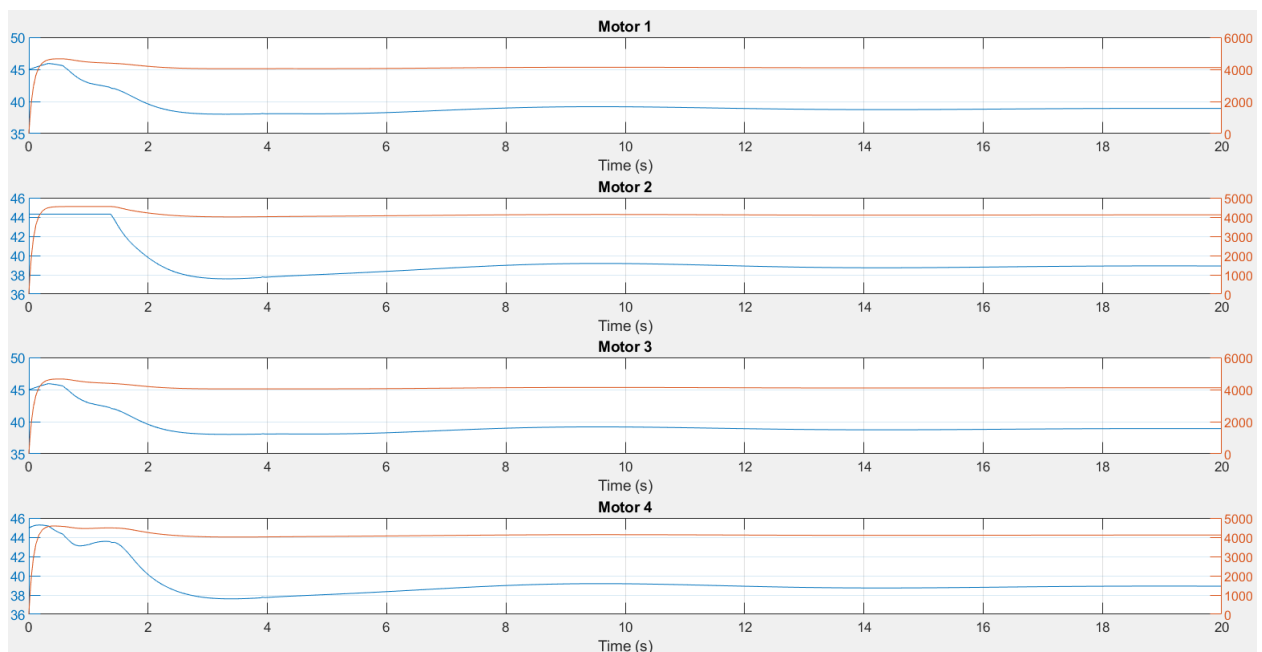


Рис. 3.5 – График мощности моторов

В сравнении с графиком из пункта [3.1.1 Стабилизация модели без ограничения мощности моторов](#) видна разница: в начале четвёртый мотор взял на себя дополнительную нагрузку для того, чтобы осуществить подъём на

заданную высоту, а затем оба мотора (2 и 4) снизили мощность, чтобы произвести стабилизацию по углам крена и тангажа.

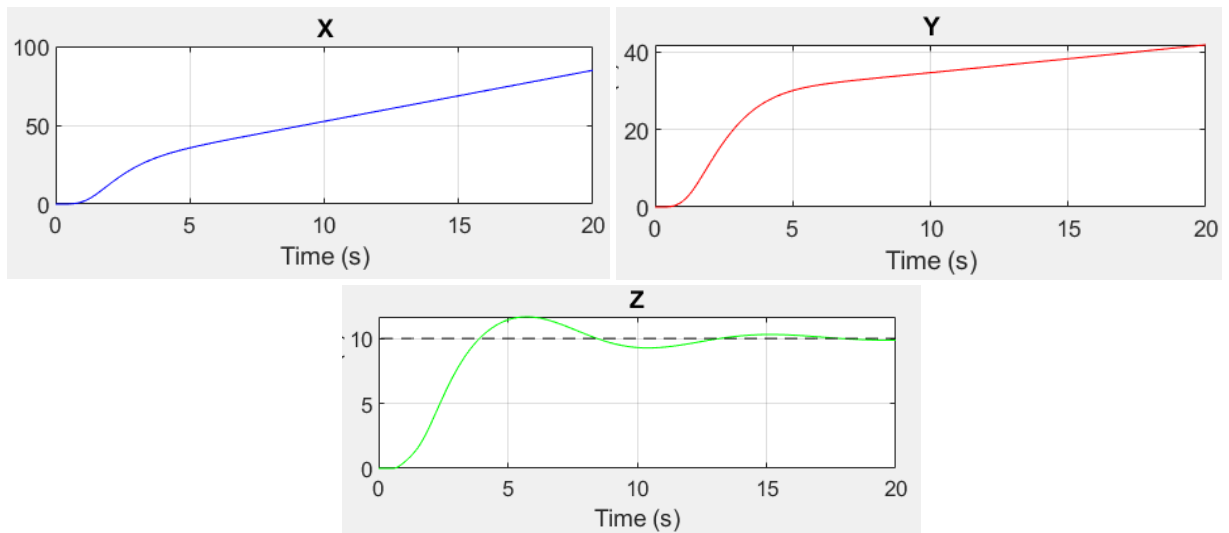


Рис. 3.6 – Графики положения в пространстве

Если ограничить максимальную мощность значением 44,1%, то стабилизация не произойдёт — модель перевернётся, едва оторвавшись от поверхности.

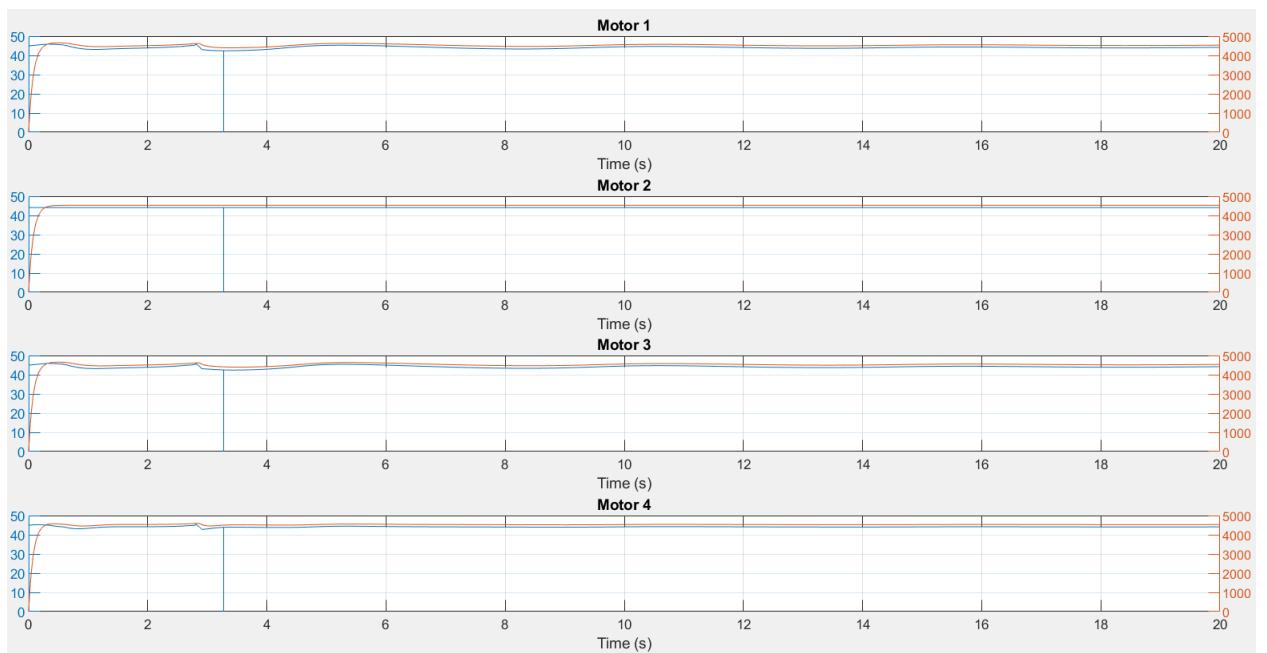


Рис. 3.7 – График мощности моторов

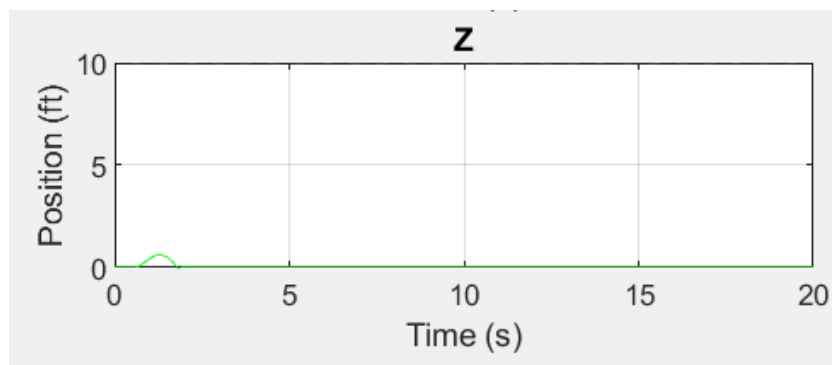


Рис. 3.8 – График положения в пространстве

3.1.3 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью двух моторов

Проведём моделирование с искусственно ограниченным максимальным одинаковым значением мощности для двух моторов и сравним полученное значение с ограничением максимальной мощности для одного из мотора.

В ходе проведения эксперимента было установлено, что максимально возможное одинаковое ограничение мощности составляет 39%.

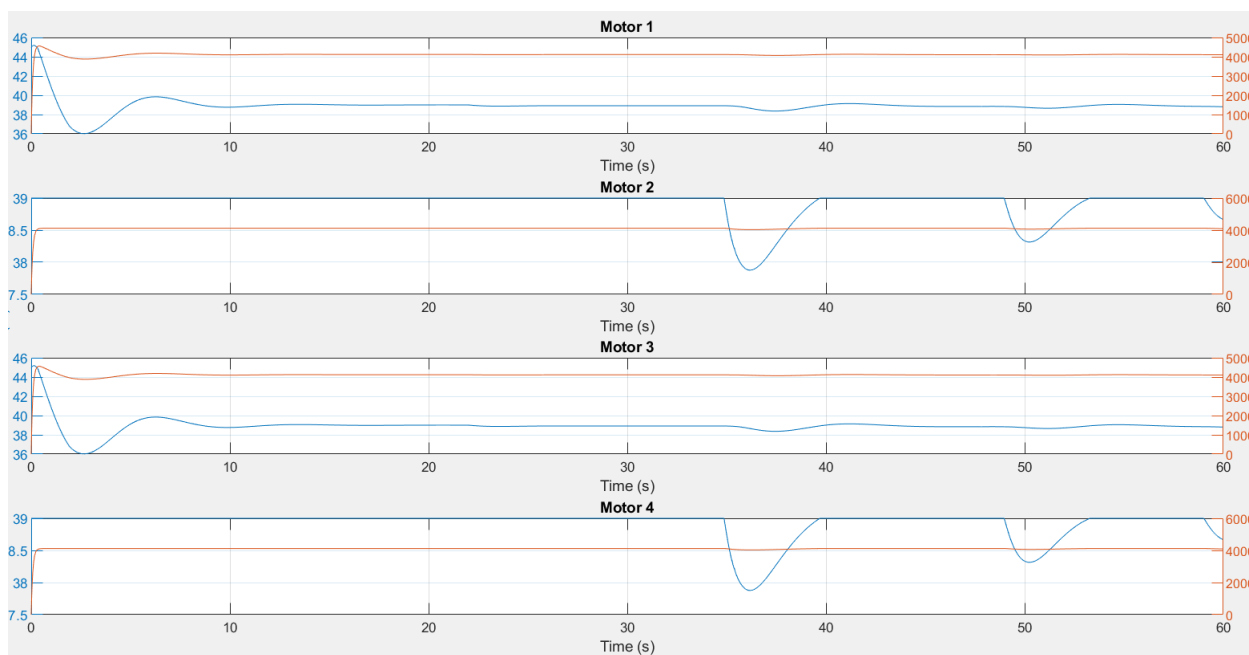


Рис. 3.9 – График мощности моторов

Как видно из графиков, 39% фактически является минимальной мощностью, при которой квадрокоптер может оторваться от поверхности.

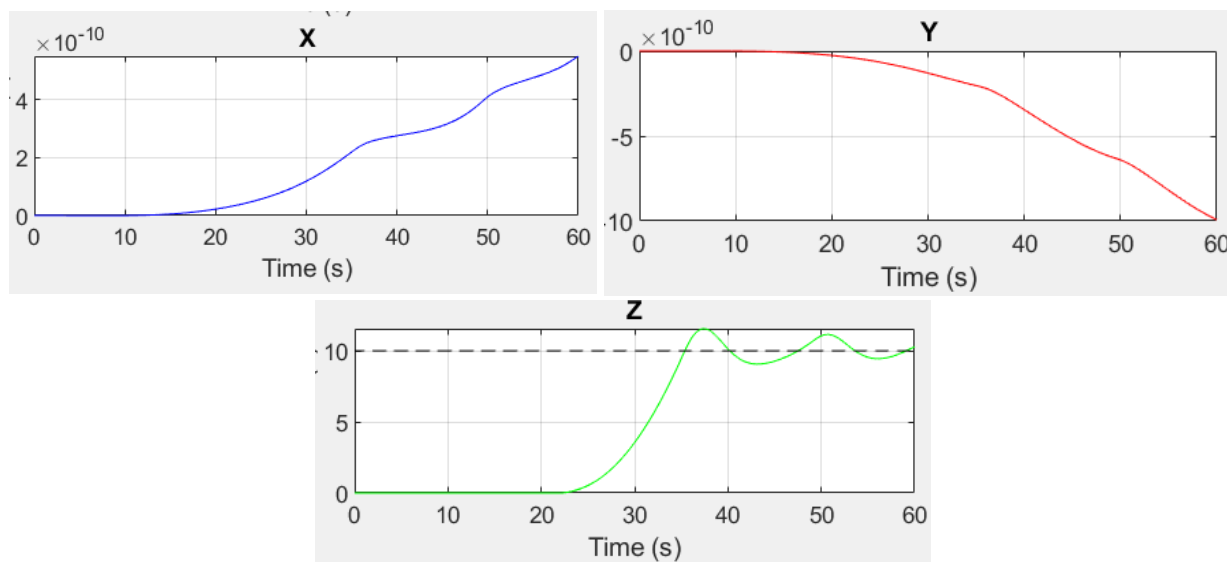


Рис. 3.10 – Графики положения в пространстве

Как видно из графиков, стабилизация произошла намного позднее, но при этом квадрокоптер не сместился по осям X и Y.

Если ограничить максимальную мощность значением 38,9%, то отрыва от поверхности не происходит.

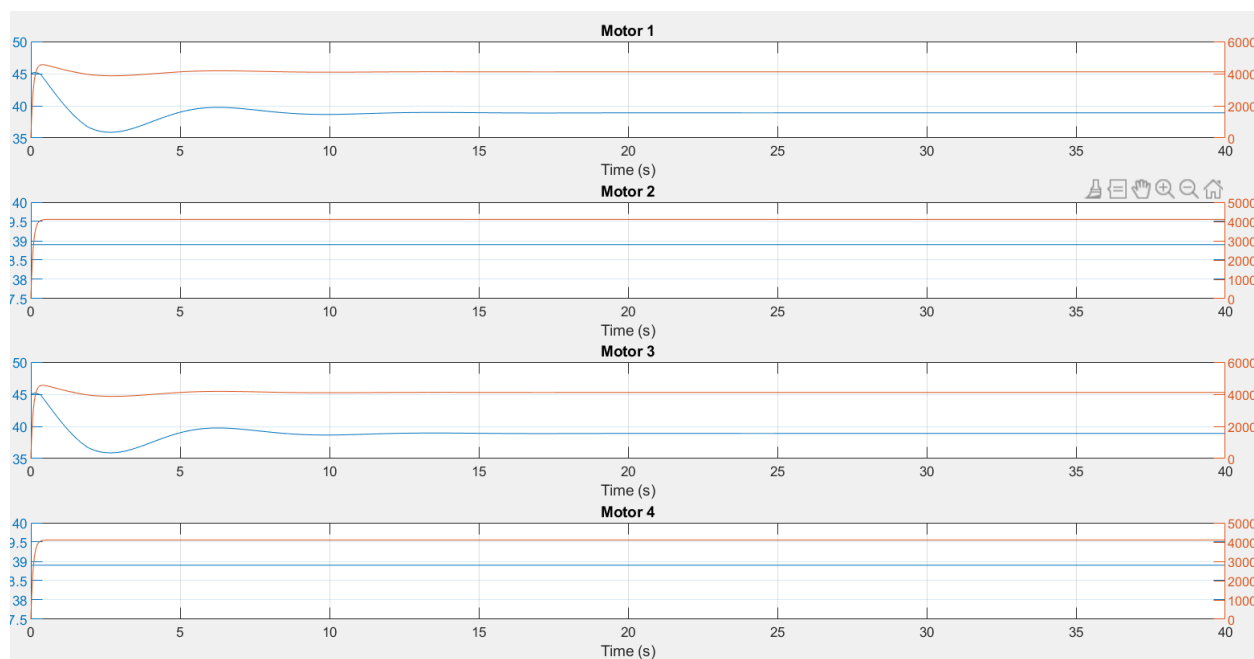


Рис. 3.11 – График мощности моторов

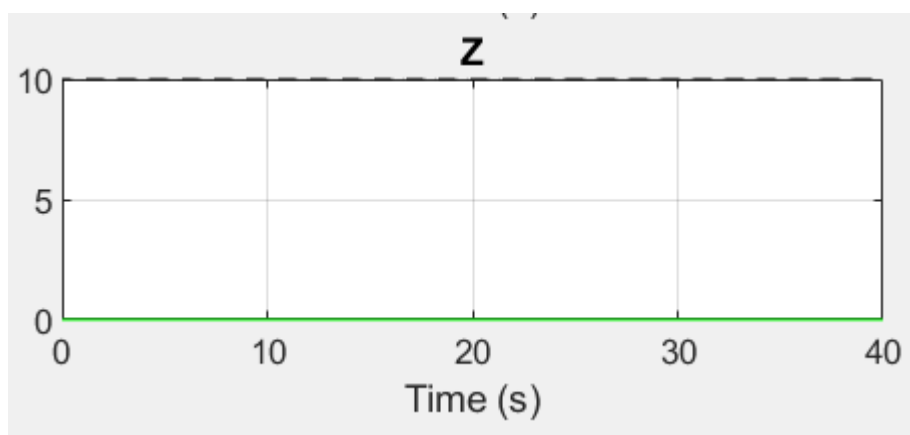


Рис. 3.12 – Графики положения в пространстве

3.2 Измененные параметры ПИД-регуляторов

Ставится задача выбора параметров K_p, K_i, K_d для стабилизации заданных значений углов φ, θ, ψ . Настройка параметров ПИД-регуляторов позволяет получить результат стабилизации аппарата при более сильном ограничении моторов. Но при этом стоит учитывать, что увеличение коэффициентов ПИД-регулятора может привести к появлению перерегулирования, которое заключается в потере управляемости и появлению осцилляций. Поэтому при изменении коэффициентов ПИД-регулятора следует учитывать следующие факторы:

1. Квадрокоптер должен корректно управляться на критических показателях углов крена и тангажа.

В ходе экспериментов было выявлено, что критическая величина углов крена и тангажа, при которой аппарат продолжает движение со стандартными настройками ПИД-регулятора, составляет 25° .

2. Во время полёта должна отсутствовать осцилляция.

В следствии данных факторов необходимо предварительно исследовать поведение модели с изменёнными коэффициентами ПИД-регулятора при критических значениях углов крена и тангажа без ограничения мощности моторов.

3.2.1 Стабилизация модели без ограничения мощности моторов

Для поиска максимально возможных коэффициентов ПИД-регулятора рассматривается случай, при котором аппарат, стабилизировавшись на высоте 10, начинает движение под углами крена и тангажа, равными 25° с целью подняться на высоту 15.

При выполнении задания с настройками ПИД по умолчанию полёт происходит стабильно.

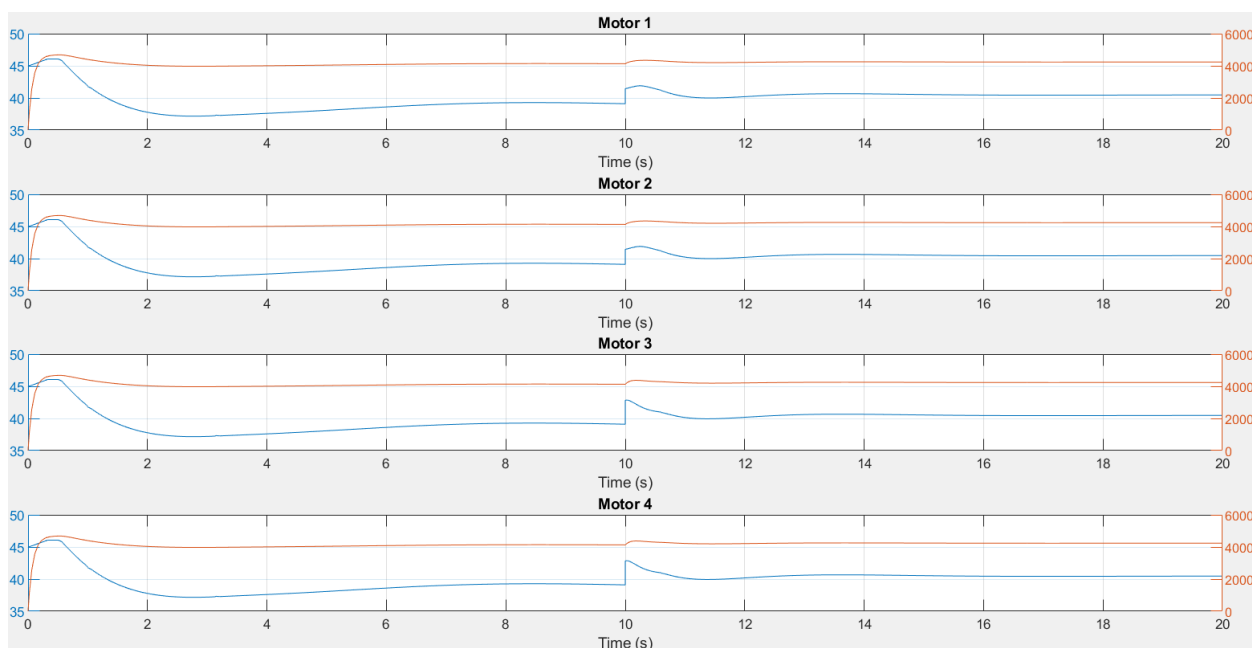


Рис. 3.13 – График мощности моторов

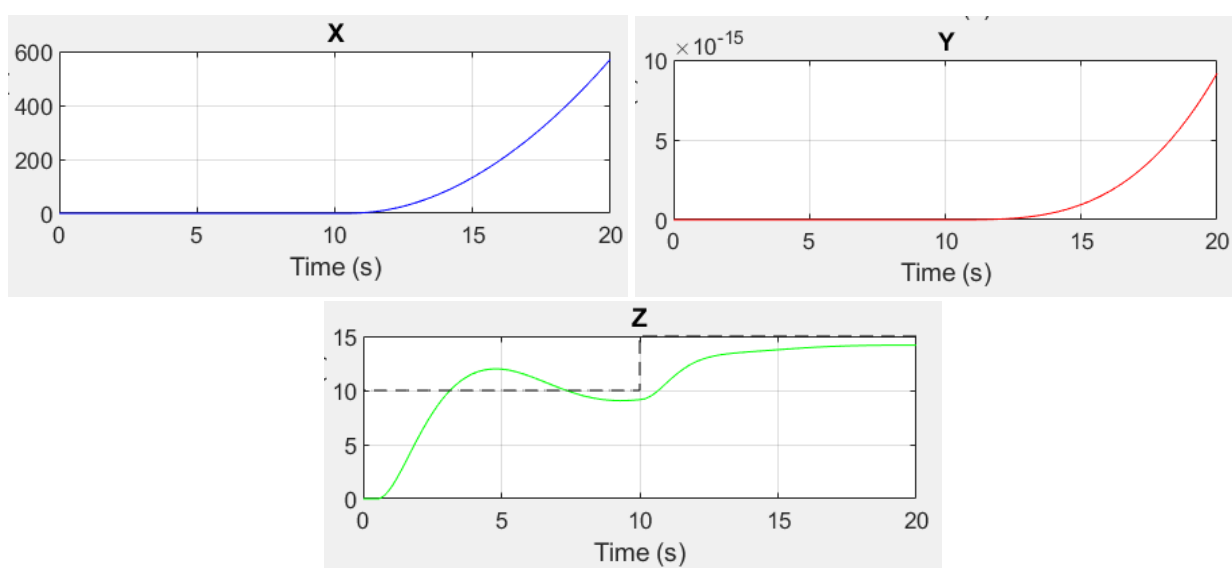


Рис. 3.14 – Графики положения в пространстве

Далее были проведены эксперименты с различными значениями коэффициентов P, I, D (подробнее см. [2.3.1 Стабилизация квадрокоптера](#)). Увеличение значений P и D положительно сказывалось на выполнении поставленной задачи; было установлено, что максимальные значения P и D, при которых полёт происходит корректно, являются величинами в 2,5 раза большими, чем стандартные.

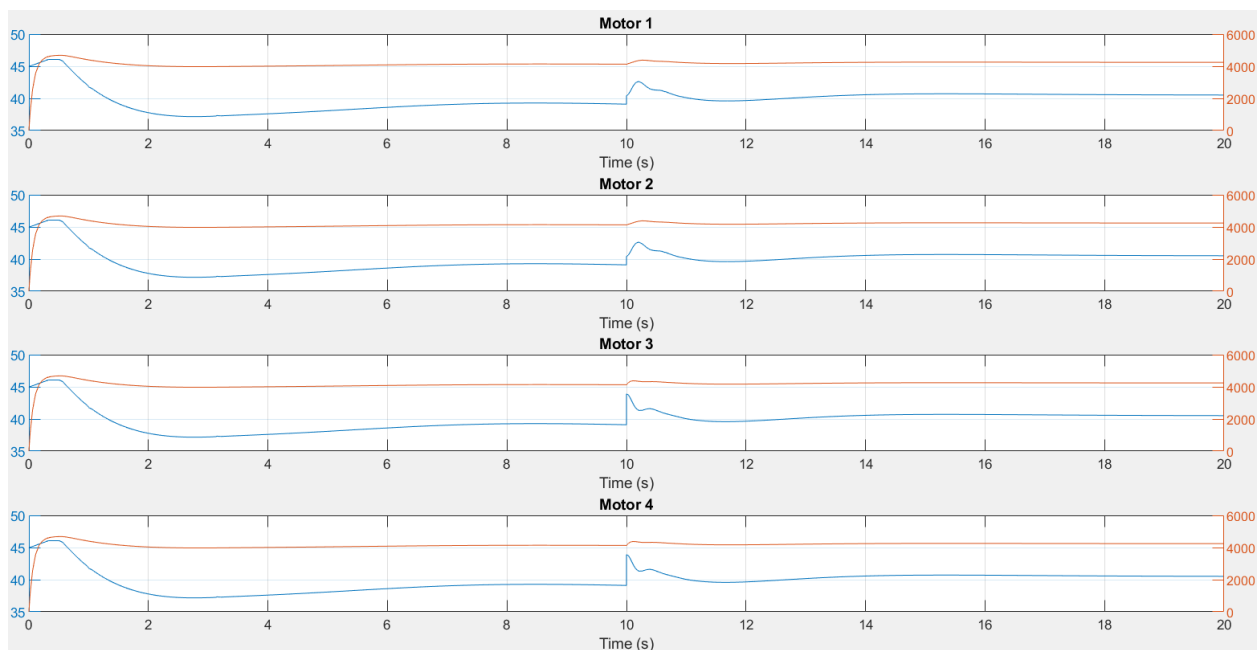


Рис. 3.15 – График мощности моторов

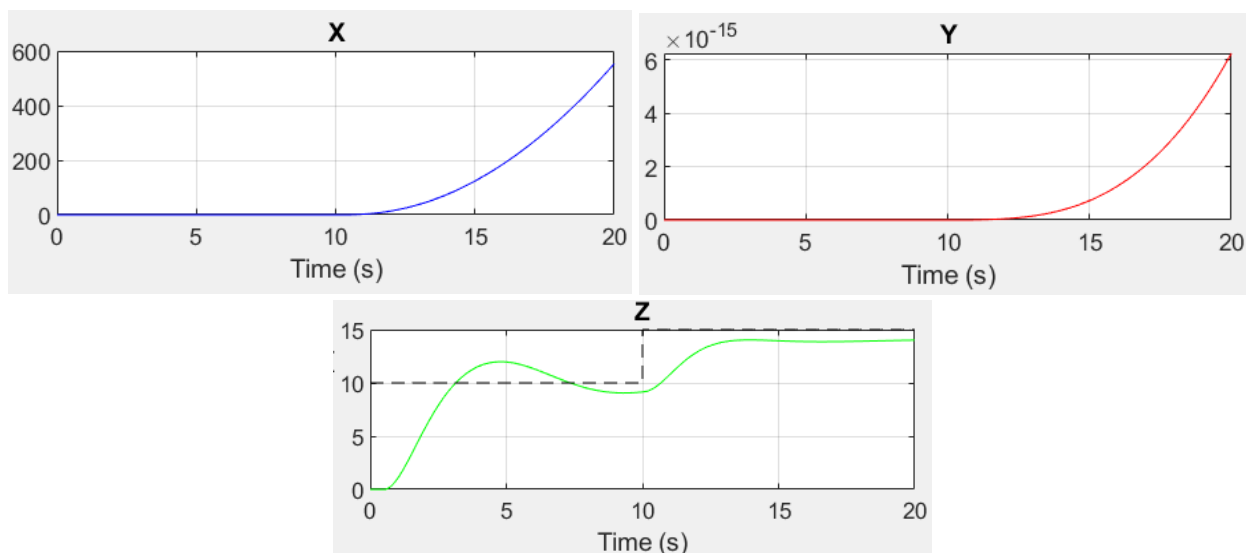


Рис. 3.16 – Графики положения в пространстве

При увеличении коэффициентов P и D в 3 раза происходит перерегулирование и квадрокоптер выполняет задачу нестабильно – появляется осцилляция.

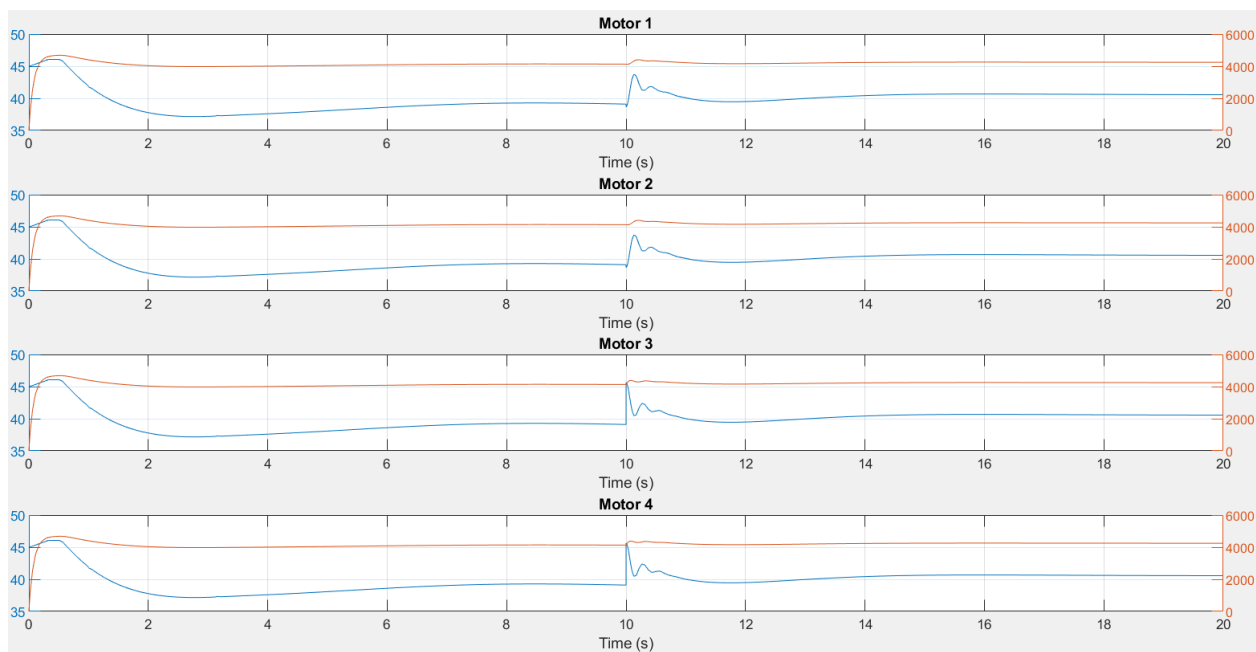


Рис. 3.17 – График мощности моторов

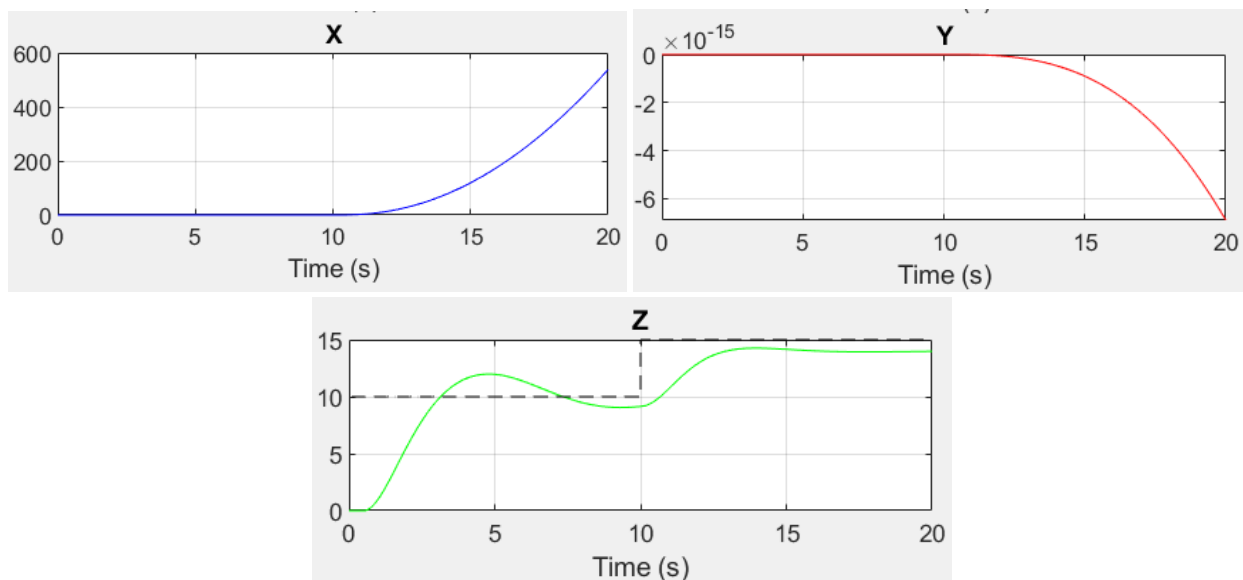


Рис. 3.18 – Графики положения в пространстве

3.2.2 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью одного из моторов

Теперь посмотрим при каком максимальной ограничении мощности одного из двигателей возможен полёт при изменённых значениях коэффициентов P и D в 2,5 раза.

В ходе проведения экспериментов было установлено, что дозированное перерегулирование, при котором взлёт и стабилизация по высоте происходит корректно, является значение 43,5%. Аппарат оказывается более устойчив к ограничениям мощности моторов.

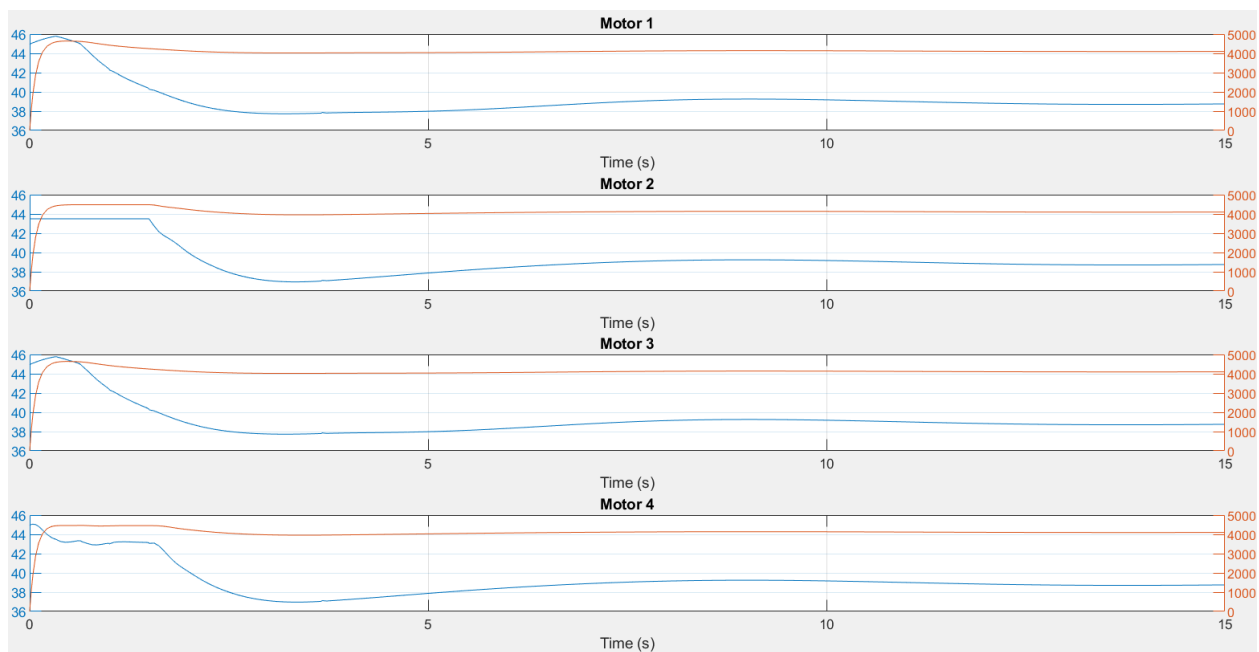


Рис. 3.18 – График мощности моторов

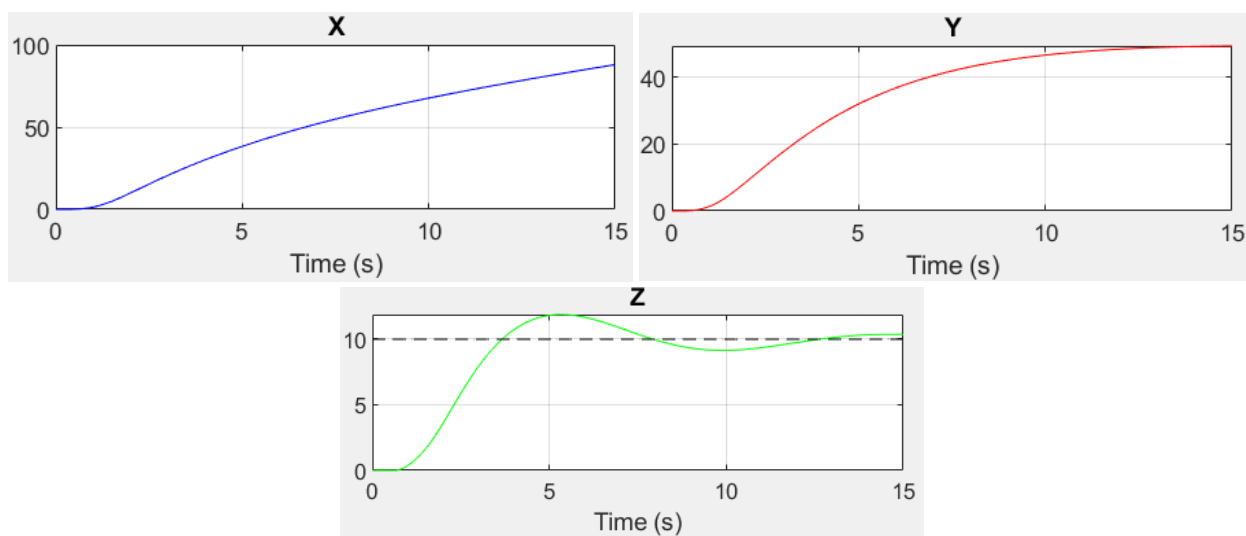


Рис. 3.19 – Графики положения в пространстве

При значении 43,4% стабилизация не происходит.

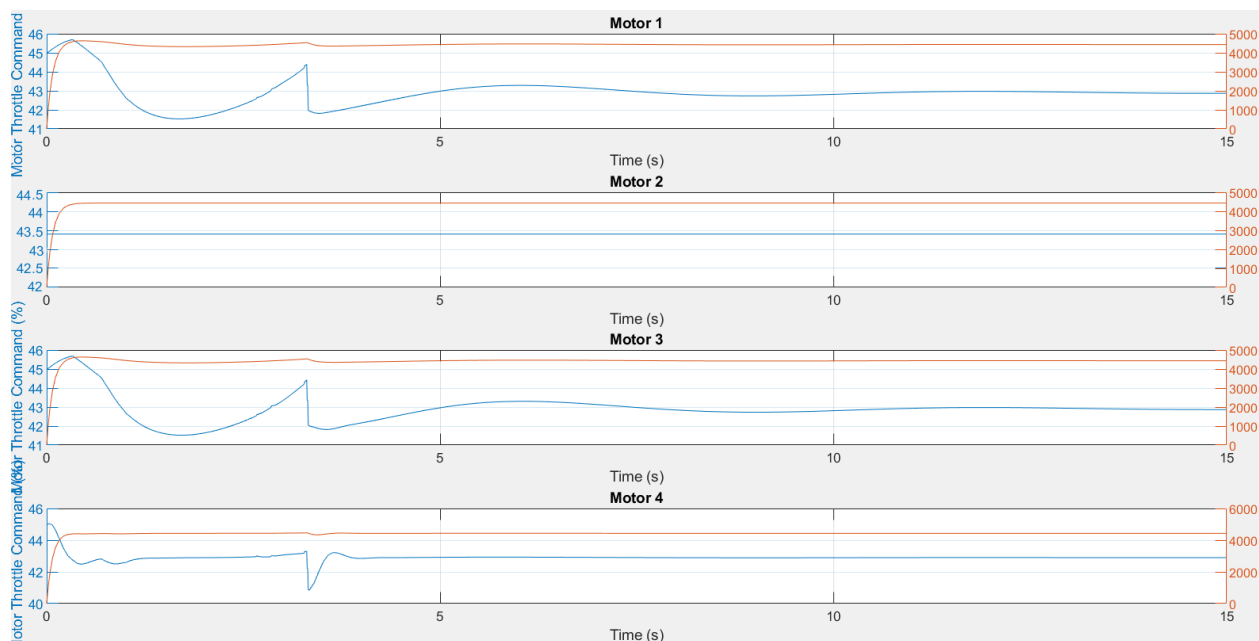


Рис. 3.20 – График мощности моторов

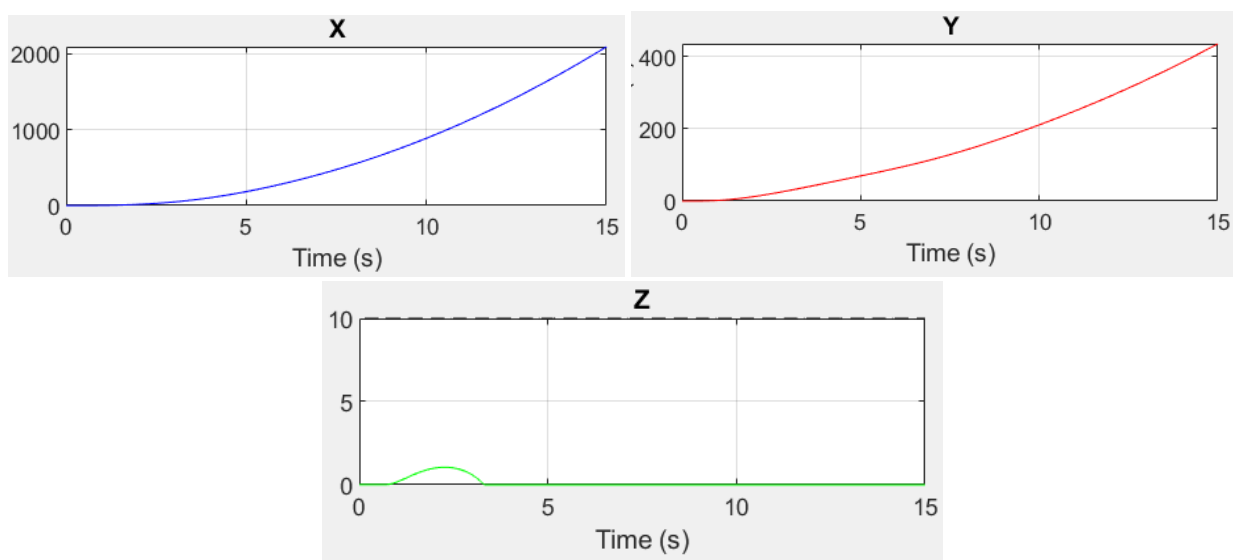


Рис. 3.21 – Графики положения в пространстве

3.2.3 Стабилизация модели с ограниченной максимальной мощностью двух моторов

При ограничении двух противоположных двигателей, ожидаемо получен тот же результат, что и со стандартными настройками ПИД, что доказывает, что 39% - минимальная мощность, достаточная для отрыва с поверхности земли.

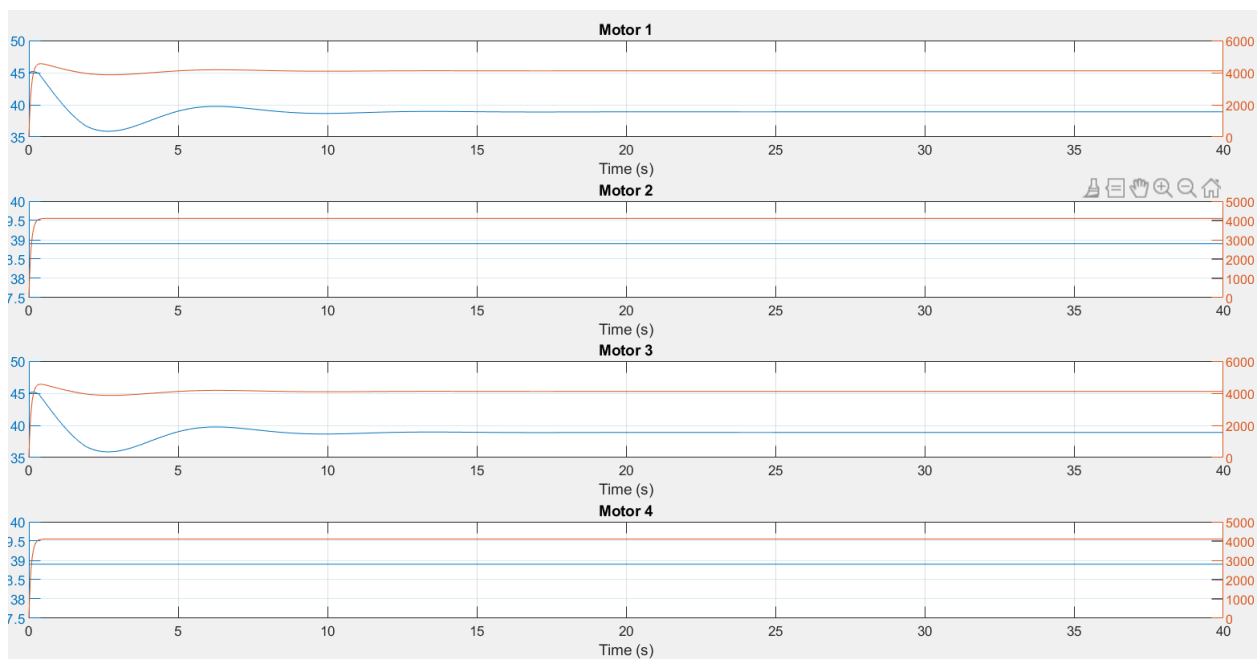


Рис. 3.22 – График мощности моторов

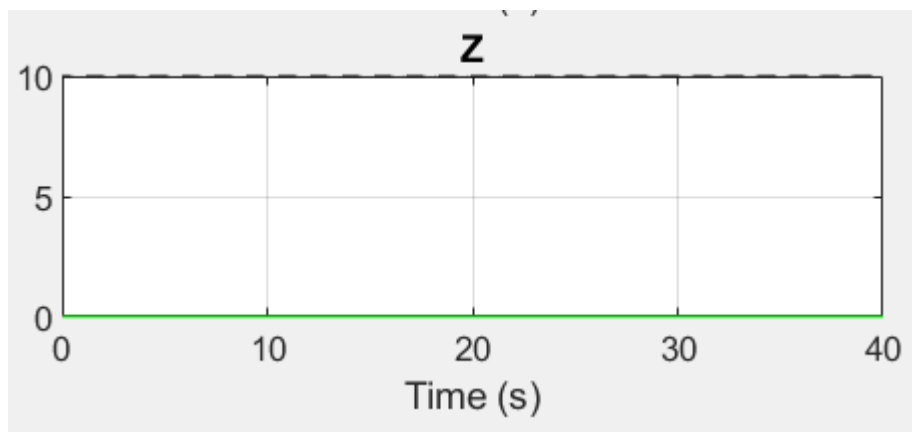


Рис. 3.23 – Графики положения в пространстве

Заключение

Из проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. При ограничении максимальной мощности одного из моторов стабилизация возможна за счёт изменения мощности других моторов.
2. При ограничении максимальной мощности двух противоположных моторов, возможная максимальная мощность для успешной стабилизации квадрокоптера получилась ниже, чем при ограничении мощности одного мотора. Из этого следует, что если бы аппарат при обнаружении возникновения ограничений мощности в одном моторе, снижал мощность противоположного, то с большей вероятностью произошёл бы успешный взлёт и стабилизация.
3. Изменяя коэффициенты ПИД-регулятора можно добиться успешной стабилизации при меньшем значении максимальной мощности мотора без критических изменений в поведении аппарата. Режим работы ПИД-регулятора с небольшим (не заметным для человеческого глаза) перерегулированием, не приводящим к существенным потерям в плавности хода аппарата, позволяет повысить устойчивость квадрокоптера.
4. Изменение коэффициентов ПИД-регулятора не влияет на мощность моторов, которая необходима для успешного отрыва от поверхности.

Список литературы

1. Канатников А.Н., Ткачев С.Б., Крищенко А.П. Допустимые пространственные траектории БЛА в вертикальной плоскости. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал 2012 г. №3. [Электронный источник] / <http://technomag.bmstu.ru/doc/367724.html> (Дата обращения: 17.03.2020).
2. Автономный квадрокоптер с нуля. [Электронный источник] / <http://habrahabr.ru/company/technoworks/blog/216437/> (Дата обращения: 02.04.2020)
3. Баранов О.В. Моделирование процесса управления беспилотным летательным аппаратом – квадрокоптером // Процессы управления и устойчивость. 2015. Т. 2. № 1. С. 23–28.
4. О ПИД – регуляторах [Электронный источник] / <http://copterpilot.ru/articles/o-pid-regulyatorax/> (Дата обращения: 11.04.2020)
5. Гурьянов А. Е. Моделирование управления квадрокоптером. Инженерный вестник. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2014
6. D. Hartman, K. Landis, M. Mehrer, S. Moreno, J. Kim. Quadcopter Dynamic Modeling and Simulation (Quad-Sim) v1.00. [Электронный источник] / <https://github.com/dch33/Quad-Sim/blob/master/README.md> (Дата обращения: 20.03.2020).
7. B. Siciliano, O. Khatib. Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008