|  |  |
| --- | --- |
|  | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ **Специального машиностроения**

КАФЕДРА **СМ11 «Подводные роботы и аппараты»**

**ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ**

Студент\_\_\_\_\_\_\_ Андреев Евгений Викторович \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*фамилия, имя, отчество*

Группа\_\_\_\_\_ СМ11-31М \_\_\_\_\_\_\_\_

Тип практики **Научно-исследовательская работа**

Название предприятия **НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Студент **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Руководитель практики **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Оценка \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*2021 г.*

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Кафедра **«Подводные роботы и аппараты»** **(СМ11)**

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение научно-исследовательской работы**

**(производственной практики)**

на предприятии **НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Студент\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Андреев Евгений Викторович СМ11-31М\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество; индекс группы)

**Тема научно-исследовательской работы:**

Разработка и исследование системы автоматического управления движением автономного необитаемого подводного аппарата.

**Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.**

**Руководитель НИР**   **/** Макашов А.А.**\_\_\_\_\_\_\_**

(подпись, дата)

**Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ /** Андреев Е.В.**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

(подпись, дата) (Фамилия И.О.)

СОДЕРЖАНИЕ

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ** 4](#_Toc61710478)

[ВВЕДЕНИЕ 5](#_Toc61710479)

[1 Техническое задание 7](#_Toc61710480)

[2 Определение параметров математической модели 9](#_Toc61710481)

[2.1 Выбор движитея 9](#_Toc61710482)

[2.2 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при движении по маршу 12](#_Toc61710483)

[2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу 14](#_Toc61710484)

[2.4 Определение присоединённых масс 14](#_Toc61710485)

[2.5 Определение моментов инерции аппарата 16](#_Toc61710486)

[2.6 Выводы по разделу 2 17](#_Toc61710487)

[3 Математические модели движения АНПА «МТ-2010» 18](#_Toc61710488)

[3.1 Передаточные функции движительно-рулевого комплекса 20](#_Toc61710489)

[3.2 Передаточная функция АНПА при движении по маршу 21](#_Toc61710490)

[3.3 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу 23](#_Toc61710491)

[3.4 Выводы по разделу 3 25](#_Toc61710492)

[4 Синтез регуляторов 27](#_Toc61710493)

[4.1 Регуляторы контура марша 28](#_Toc61710494)

[4.2 Регуляторы контура курса 34](#_Toc61710495)

[4.3 Выводы по разделу 4 39](#_Toc61710496)

[5 Исследование контуров 40](#_Toc61710497)

[5.2 Выводы по разделу 5 45](#_Toc61710498)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 47](#_Toc61710499)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 48](#_Toc61710500)

[Приложение А. Сценарий для задания параметров математической модели АНПА 49](#_Toc61710501)

[Приложение Б. Сценарий для построения графиков траектории 52](#_Toc61710502)

[Приложение В. Сценарий для автоматического запуска моделирования с различными скоростями движения 53](#_Toc61710503)

1. **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;

СУ – система управления;

ДРК – движительно-рулевой комплекс;

ВМА – винтомоторный агрегат.

# ВВЕДЕНИЕ

Вооруженные силы государств мира все больше интегрируют беспилотные системы различного назначения в свои арсеналы. Для военно-морских сил рассматриваются три категории такого оборудования: автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), необитаемые надводные аппараты, или суда и беспилотные летательные аппараты. Для патрулирования подводных границ, портов, а также различных подводных сооружений используются АНПА, способные выполнять поставленные задачи без участия человека.

Однако ёмкость энергоносителя аппарата ограничена, в связи с чем возникает необходимость периодической подзарядки. Для сокращения времени простоя, обеспечения непрерывности выполнения поставленных задач и недопущения раскрытия своего местоположения возможным противником используются донные зарядные станции, соединённые кабелем с берегом.

Для осуществления стыковки с донной зарядной станцией необходимо решить задачи навигации, построения оптимальной траектории и следования полученной траектории. Точность следования заданной траектории напрямую зависит от качества системы управления движением – важнейшей системы АНПА. Она включает в себя локальные контуры управления углами курса, дифферента и крена, движением по маршу, глубине и лагу, а также алгоритмы следования заданной траектории.

В данной работе приведены результаты синтеза системы управления торпедообразным автономным аппаратом, прототипом которого являлся АНПА МТ-2010, разработанный в институте проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. Несмотря на общеизвестность методики расчёта контуров управления, синтез необходимо проводить всякий раз для каждого вновь разрабатываемого аппарата, а потому данная задача является актуальной.

Целью данной работы является построение системы управления АНПА для движения в плоскости горизонта и осуществления стыковки с донной зарядной станцией.

В соответствии с поставленной целью можно сформулировать следующие задачи:

* выбор движителя;
* определение необходимых параметров математической модели;
* построение математической модели АНПА;
* синтез контуров управления движением в плоскости горизонта.

# 1 Техническое задание

В данном курсовом проекте будет рассмотрено построение системы управления (СУ) движением автономного необитаемого подводного аппарата МТ-2010 по маршу и курсу. Внешний вид аппарата показан на рисунке Рисунок 1.



Рисунок 1 – АНПА МТ-2010

Проектируемая СУ должна обеспечить следование аппарата по траектории обхода донной зарядной станции, как показано на рисунке Рисунок 2. Обход осуществляется с целью поиска стыковочного узла и последующей безударной стыковки. Маневрирование происходит в плоскости горизонта, контуры марша и курса работают поочерёдно и в режиме переброски для обеспечения движения по ломаной.

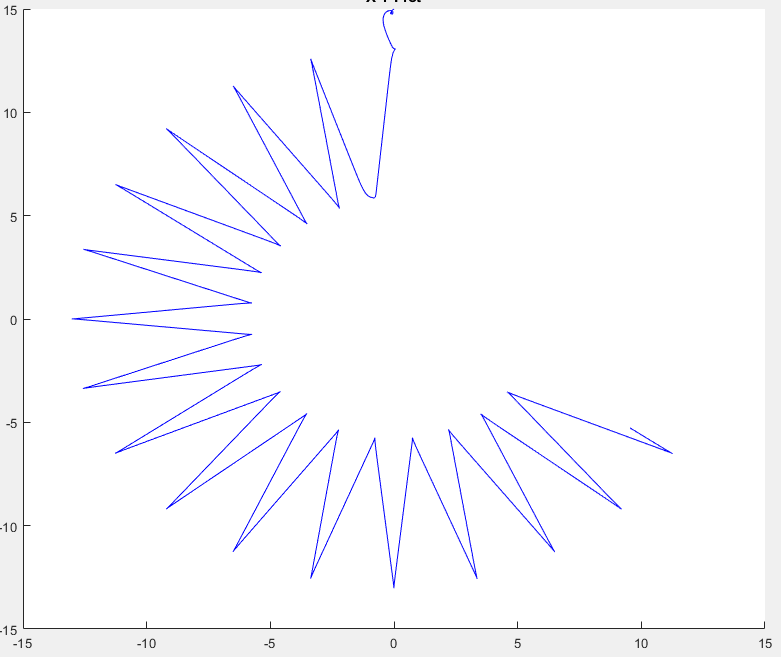


Рисунок 2 – Траектория обхода донной зарядной станции

Тактико-технические характеристики приведены в таблице Таблица 1.

Таблица 1 – Тактико-технические характеристики МТ-2010

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Максимальная рабочая глубина, м | 3000 |
| Вес, кг | 300 |
| Габариты, м | ∅0,45 × 3,0 |
| Скорость, м/с | 0-2,5 |
| Автономность, ч (пробег ~ 100 км); | 20 |
| Энергетика: емкость батареи литий-ионных аккумуляторов, кВт·ч | 2,6 |

# 2 Определение параметров математической модели

## 2.1 Выбор движитея

Для построения математической модели движения АНПА необходимо выбрать движитель. Выберем винтомоторный агрегат (ВМА) 049-E 120-100 высокоэффективной серии, показанный на рисунке Рисунок 3, от китайского производителя Lian [1].

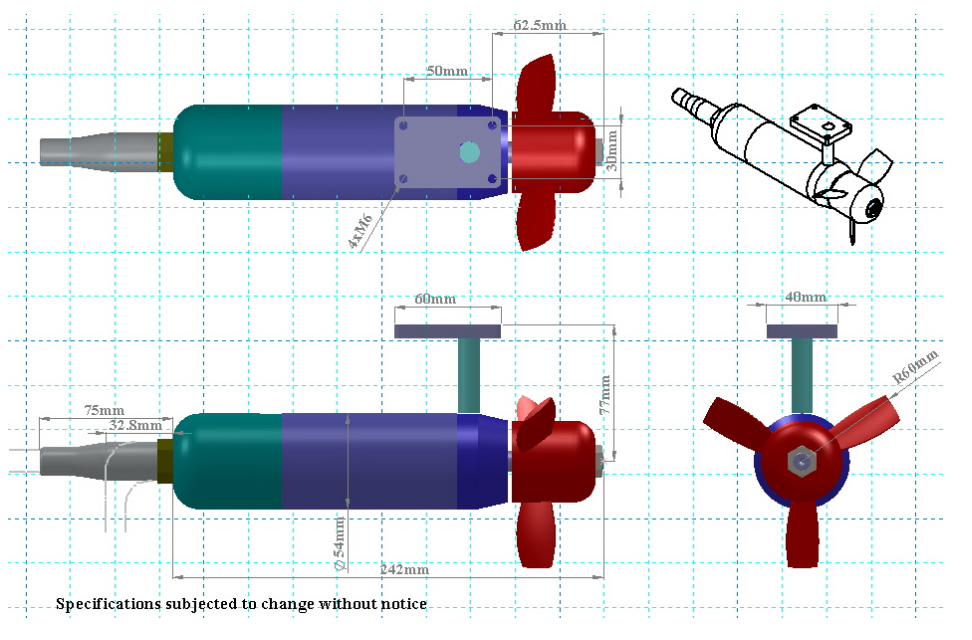


Рисунок 3 – Внешний вид винтомоторного агрегата 049-E 120-100

Параметры выбранного движителя представлены в таблице Таблица 2.

Таблица 2 – Параметры движителя 049-E 120-100

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Тяга (при 2-х узлах), кгс | 60 |
| Вес, кг | 1,2 |
| Входное напряжение, В | 24-350 |
| Наибольший КПД (при 6 узлах), % | 63 |
| Максимальная мощность (при 6 узлах), Вт | 170 |

Уравнение, описывающее электрические процессы двигателя:

, где

U – напряжение, подаваемое на движитель, B;

i – ток движителя, А,

R – сопротивление обмоток движителя, Ом,

L – индуктивность обмоток движителя, Гн,

Ke – коэффициент противоЭДС, В,

 – угловая скорость вращения вала движителя с-1.

Уравнения момента могут быть представлены как:

,

где – коэффициент момента движителя, ;

|  |  |
| --- | --- |
| ,  – суммарный момент инерции движителя, кг ∙м2,  – коэффициент гребного винта, кг ∙м2. |  |

По приведённым выше уравнениям составим структурную схему движителя, показанную на рисунке Рисунок 4.

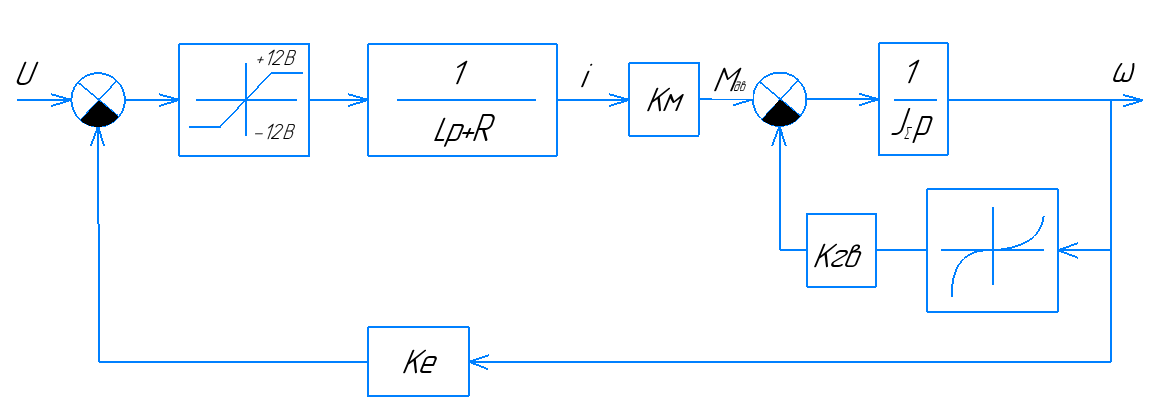


Рисунок 4 – Нелинейная структурная схема движителя

Движитель является покупным устройством и представляет собой совокупность электродвигателя и гребного винта. Передаточную функцию движителя представим апериодическим звеном с коэффициентом усиления Кдв, а постоянную времени примем равной 0,3 с, поскольку небольшой ВМА обладает малой инерцией.

Итоговое уравнение динамики движителя:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

а передаточная функция примет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где

|  |  |
| --- | --- |
| − напряжение, В,  − тяга одного движителя, Н,  − постоянная времени движителя, с,  − коэффициент усиления движителя, Н/В. |  |

## 2.2 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при движении по маршу

С помощью пакета Solidworks Flow Simulation 2019 [2] исследуем гидродинамические характеристики упрощённой модели ПА, показанной на рисунке Рисунок 5.

Параметры, указанные при создании проекта:

1. базовая ось – Х;
2. тип задачи – внешняя;
3. текучая среда – жидкость (вода);
4. тип течения – ламинарное и турбулентное.

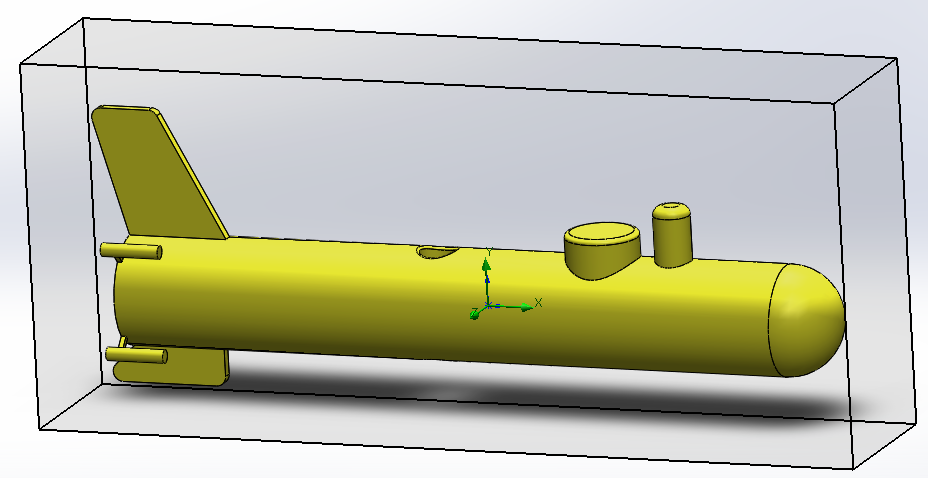


Рисунок 5 − Расчётная область

В созданном проекте в разделе «Новое параметрическое исследование» в качестве параметра указываем значения скорости вдоль базовой оси Х в виде таблицы как на рисунке Рисунок 6.

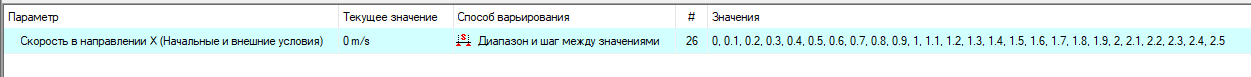


Рисунок 6 – Табличное задание параметра

В качестве выходного параметра указываем значение силы вдоль оси Х. Результаты расчёта представлены на рисунке Рисунок 7.

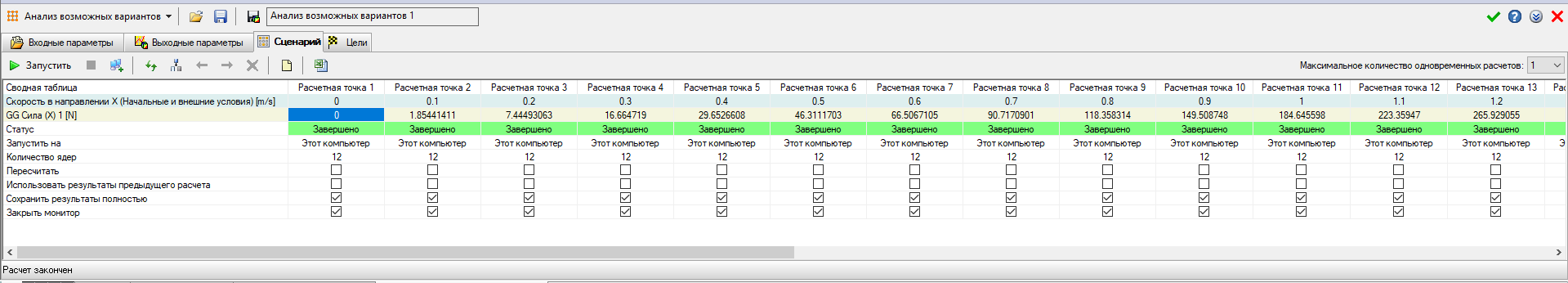


Рисунок 7 – Результаты параметрического исследования

Экспортируем данные в Excel и построим график (рисунок 5). По полученному в результате моделирования графику можем вывести аналитическую зависимость [6] силы сопротивления R от скорости набегающего потока Vx (рисунок Рисунок 8).



Рисунок 8 − Аналитическая зависимость силы гидродинамического сопротивления от скорости набегающего потока

Таким образом, выявленная зависимость имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
| , где | (2) |

## 2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу

Действуя аналогичным образом, определим момент гидродинамического сопротивления при повороте по курсу.

|  |  |
| --- | --- |
| , где | (3) |

## 2.4 Определение присоединённых масс

Для составления математической модели АНПА при движении по маршу определим коэффициент присоединённых масс . Для его нахождения воспользуемся методом эквивалентного эллипсоида, описанным в [3]. Для начала необходимо определить полуоси *a, b* и *c* эквивалентного эллипсоида, показанные на рисунке Рисунок 9.

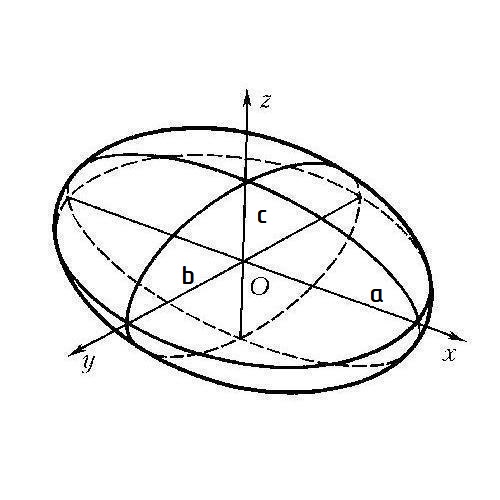


Рисунок 9 – Расположение полуосей эллипсоида

где

L и D – длина и диаметр АНПА согласно таблице Таблица 1.

Отношение b/a = 0,15. Тогда по графикам на рисунке Рисунок 10 определим k11 = 0,04 и k55 = 0,8.

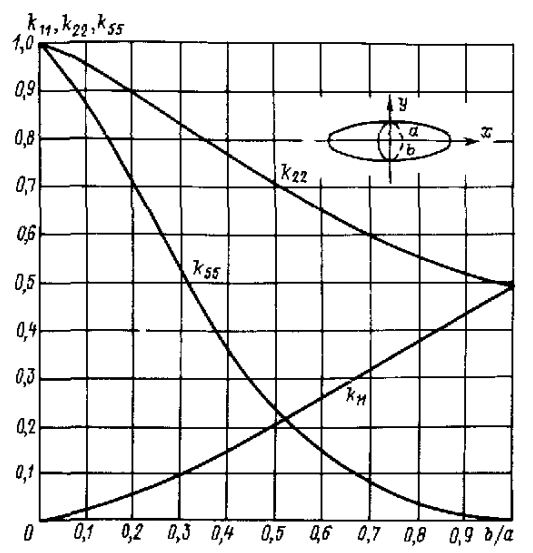


Рисунок 10 – Графики коэффициентов присоединённых масс

По формулам, указанным в [3, с. 76], посчитаем коэффициенты присоединённых масс:





## 2.5 Определение моментов инерции аппарата

Для построения математической модели АНПА при повороте по курсу требуется определить момент инерции . По данным таблицы Таблица 1 найдём объём аппарата:

где

d – диаметр АНПА,

L – длина по габаритам.

Определим среднюю плотность аппарата: что много меньше плотности воды и не удовлетворяет условию нулевой плавучести.

В Solidworks в качестве материала выберем воду и рассчитаем момент инерции вокруг вертикальной оси как 

## 2.6 Выводы по разделу 2

По результатам исследований и расчётов раздела 1 определены недостающие параметры для построения математической модели АНПА МТ-2010. Рассчитанные коэффициенты приведены в таблице Таблица 3.

Таблица 3 – Определённые параметры математической модели

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Тяга одного движителя |  |
| Постоянная времени движителя |  |
| Коэффициент усиления движителя |  |
| Квадратичный коэффициент гидродинамического сопротивления при движении по маршу |  |
| Линейный коэффициент гидродинамического сопротивления при движении по маршу |  |
| Квадратичный коэффициент гидродинамического сопротивления при повороте по курсу |  |
| Линейный коэффициент гидродинамического сопротивления при повороте по курсу |  |
| Коэффициент присоединённых масс | 12,72 кг |
| Коэффициент присоединённых масс | 117,08 кг |
| Момент инерции аппарата вокруг вертикальной оси Jyy |  |

# 3 Математические модели движения АНПА «МТ-2010»

Для достижения поставленных целей необходимо составить математическую модель ПА. В векторной форме уравнения движения аппарата могут быть представлены системой двух уравнений следующего вида [4]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| D:\Университет\7 семестр\НИРС\Поправь\syst.png |  |  |

где векторы количества движения тела и жидкости, вовлекаемой в движение, соответственно; - векторы моментов количества движения тела и жидкости относительно начала координат связанной системы соответственно; - вектор угловой скорости тела; - вектор скорости начала связанной системы координат; - главный вектор и главный момент относительно начала координат внешних сил, действующих на аппарат.

Уравнения движения АНПА в проекциях на связанные оси координат (см. рисунок Рисунок 5), с учётом того, что плоскость Оху является плоскостью симметрии аппарата, и присоединённые массы и равны нулю, принимают вид:













где , , - присоединённые массы аппарата [3, 4],

- проекции вектора на связанные оси, - проекции вектора на связанные оси, - осевые моменты инерции аппарата,

- центробежный момент инерции аппарата, - координаты центра тяжести аппарата.

## 3.1 Передаточные функции движительно-рулевого комплекса

Поскольку в исходных данных не указано положение маршевых движителей, примем оси движителей параллельными оси ОХ и назначим плечо равным диаметру аппарата: . Тогда передаточная функция ДРК АНПА при движении по маршу в соответствии с (1) примет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где

 − тяга ДРК, H,

− передаточная функция одного движителя,

|  |  |
| --- | --- |
| − коэффициент усиления движительно-рулевого комплекса, Н/В, |  |
| − постоянная времени движительно-рулевого комплекса, с. |  |

Передаточная функция ДРК АНПА при повороте по курсу:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где

 - суммарный момент ДРК, Н∙м;

− коэффициент усиления движительно-рулевого комплекса канала курса, Н∙м/В.

## 3.2 Передаточная функция АНПА при движении по маршу

Для дальнейшей проработки математической модели ПА примем следующие допущения:

1. Приоритетными контурами являются контуры марша и курса, в то время как контур глубины настроен на автоматическое поддержание заданного значения, лаговое движение не осуществляется;

2. Углы дифферента и крена пренебрежимо малы, скорости поворота ПА по дифференты и крену равны нулю ();

3. Осуществляем сепаратное управления контурами марша и курса, поэтому взаимовлиянием каналов можем пренебречь.

Будем рассматривать движение аппарата по маршу и поворот по курсу.

Таким образом, приведённая выше система уравнений примет вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| D:\Университет\7 семестр\НИРС\Поправь\syst.png |  | (6) |

где *РДРКx* – суммарная тяга ДРК АНПА, *Rx* – сила гидродинамического сопротивления, – возмущающая сила, МДРКy – суммарный момент ДРК, Мy – гидродинамический момент сопротивления, действующий на аппарат, – возмущающий момент.  и не известны, поэтому их направление условно принимаем положительным.

Итоговая математическая модель движения аппарата может быть сведена к рассмотрению первого выражения системы (6). Конкретизируем полученные уравнения с учётом полученного ранее выражения (2) для гидродинамической силы:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| D:\Университет\7 семестр\НИРС\Поправь\syst.png |  | (7) |

Представим первое уравнение системы (7) в виде структурной схемы как показано на рисунке Рисунок 11.

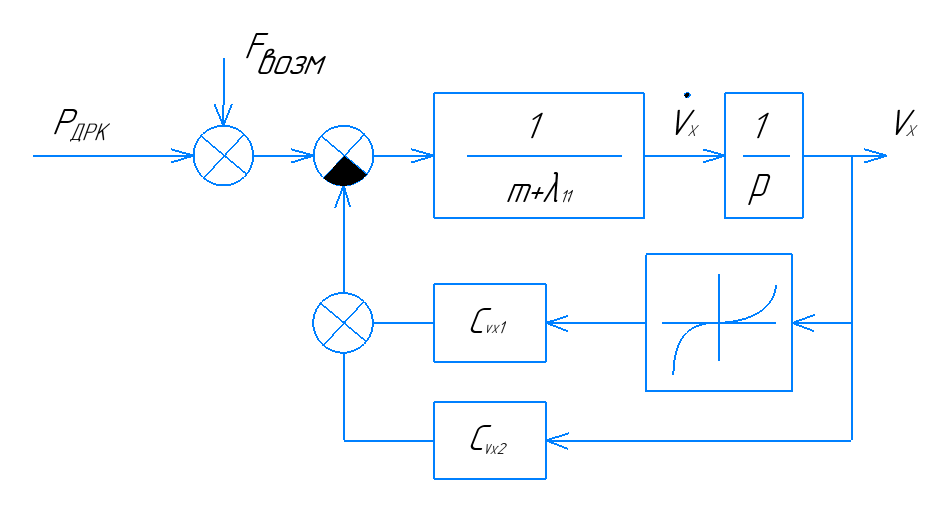
****

Рисунок 11 − Структурная схема управления маршевой скоростью АНПА с нелинейностью от сил гидродинамического сопротивления

Зададим скорость обхода донной зарядной станции во время стыковки Vx\* = 0,2 м/с и линеаризуем первое уравнение системы (7) разложением в ряд Тейлора с последующим отбрасыванием слагаемых со степенью два и выше [6] в окрестности этой скорости. Тогда

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Получим передаточную функцию канала маршевой скорости.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

где

|  |  |
| --- | --- |
| − коэффициент усиления канала марша, | (10) |
| − постоянная времени канала марша. | (11) |

## 3.3 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу

Уравнение, описывающие движение АНПА по курсу, составленное на основе (7):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |

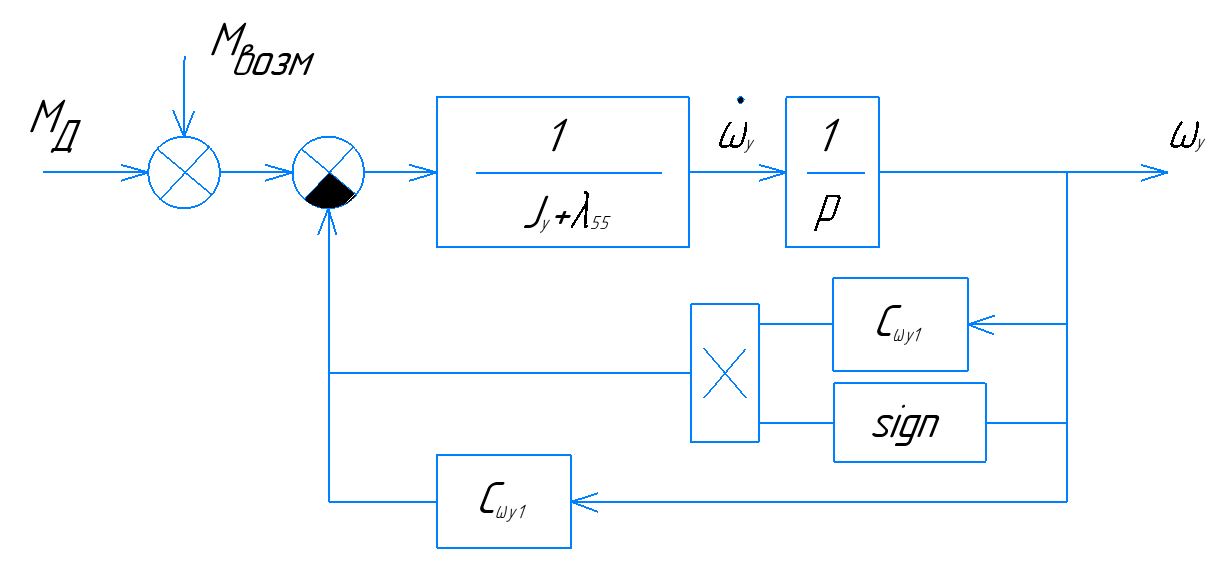
****

Рисунок 12 − Нелинейная структурная схема канала курса

Проведём линеаризацию разложением в ряд Тейлора с последующим отбрасыванием слагаемых со степенью два и выше в окрестности скорости  уравнения (12). В итоге получим:

 и



Структурная схема показана на рисунке Рисунок 13.

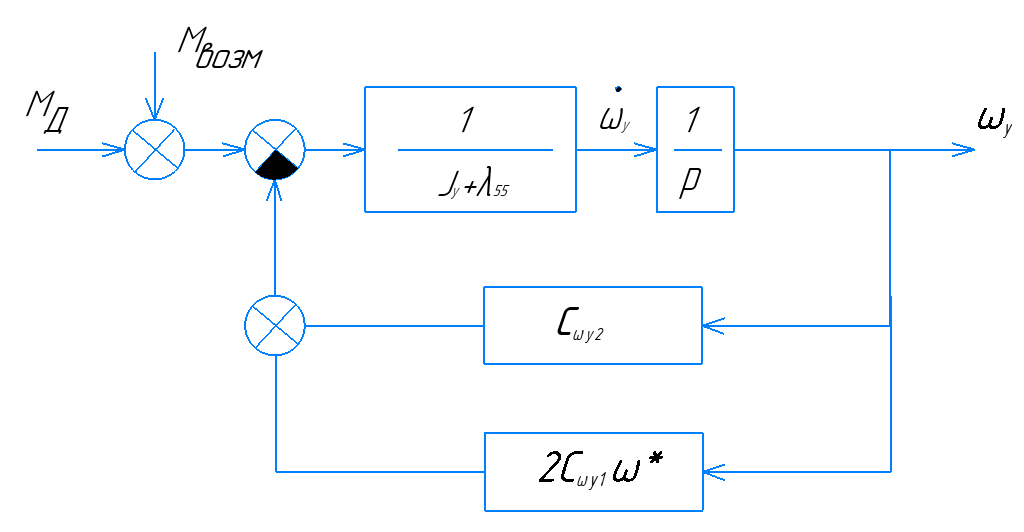


Рисунок 13 − Линеаризованная структурная схема курса

Получим передаточную функцию канала курса по скорости:



где

|  |  |
| --- | --- |
| − коэффициент усиления ПФ курсовой скорости; | (13) |
| − постоянная времени ПФ курсовой скорости; | (14) |

− передаточная функция АНПА канала скорости при повороте по курсу.

Тогда сама ПФ канала курса:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

## 3.4 Выводы по разделу 3

В данном разделе были проделаны следующие работы:

* составлены передаточные функции движительно-рулевого комплекса АНПА при движении по маршу и повороту по курсу,
* на основе выбранных предположений из общих уравнений динамики получены уравнения динамики для исследуемых контуров,
* составлены структурные схемы соответствующих каналов управления движения АНПА,
* выведены передаточные функции по скорости для исследуемых контуров.

# 4 Синтез регуляторов

Параметры математических моделей, описывающих движение ПА как объекта управления, меняются, т.к. они зависят от нескольких факторов: скорости движения, углов наклона аппарата [5]. Поэтому для придания СУ требуемых динамических качеств необходимо ввести регуляторы. Наиболее популярны линейные регуляторы, поскольку они просты в реализации, а также существует множество методик их синтеза.

В работе [5] были рассмотрены характеристики СУ в зависимости от количества внутренних обратных связей:

- с обратной связью по положению;

- с обратными связями по положению и по скорости;

- с обратными связями по положению, скорости и ускорению.

Оптимальным вариантом с точки зрения сложности реализации, а также величины перерегулирования и времени переходного процесса является СУ с двумя обратными связями, как показано на рисунке Рисунок 14.

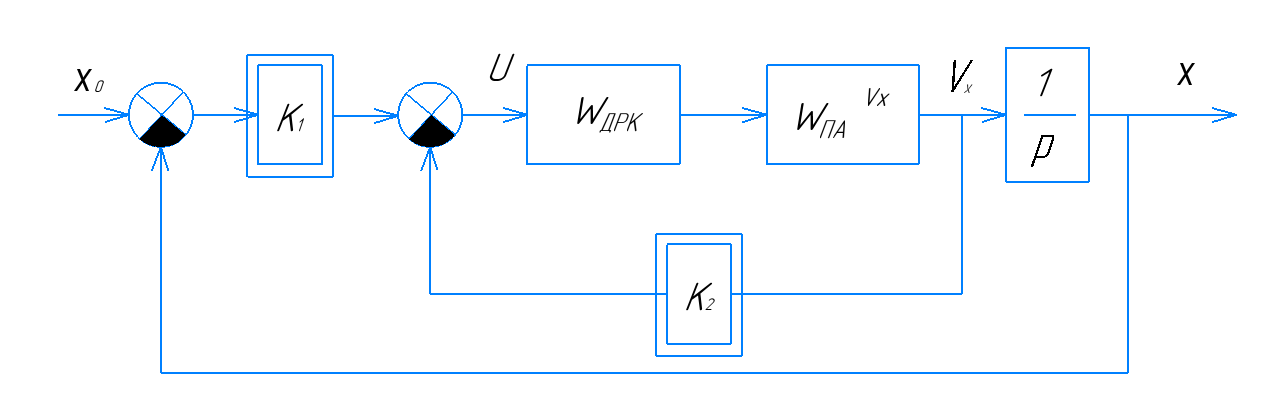


Рисунок 14 − Структурная схема модели АНПА при движении по маршу с обратными связями

На схеме присутствуют размерные коэффициенты К1 и К2, которые и необходимо синтезировать.

## 4.1 Регуляторы контура марша

Для нахождения коэффициента  в ветви обратной связи по скорости воспользуемся методом стандартных характеристических полиномов [6, 7, 8]. Для этого в соответствии с рисунком Рисунок 14 составим передаточную функцию по скорости для контура управления маршем.





С учётом выражений (9), (10) и (11) получим:

|  |  |
| --- | --- |
| , где | (15) |



|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

Выразим коэффициент демпфирования  через постоянную времени передаточной функции по скорости:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

С учётом выражений (9), (10) и (11) получим:



Из выражения (16) для  выразим коэффициент К2:

, а из формулы (17) извлечём постоянную времени Tv ПФ по скорости канала марша. Коэффициент демпфирования примем равным 0,707, чтобы перерегулирование составляло менее 5% и время переходного процесса примерно равнялось трём постоянным времени Tv [6, 7].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Здесь и далее синтез регулятора производим для наихудшего с точки зрения устойчивости случая – нахождения АНПА на стопе [9]. После подстановки всех известных параметров согласно таблице Таблица 3 получим

.

Проверим устойчивость внутреннего контура скорости с нелинейностью движителей типа "насыщение" и без неё. Структурная схема представлена на рисунке Рисунок 15. Наихудшим с точки зрения устойчивости является случай нахождения АНПА «на стопе», поэтому на вход системы подадим малый сигнал, равный 0,02 м/с.

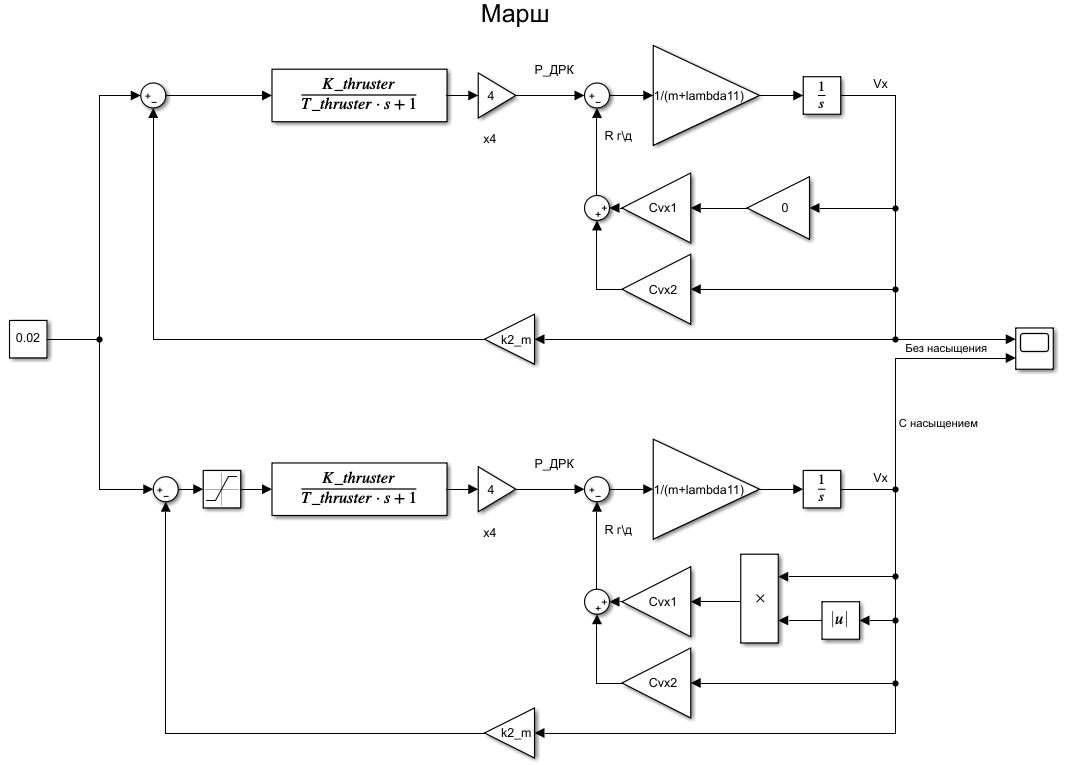


Рисунок 15 – Структурная схема контура скорости канала марша с нелинейностью и без неё

Результаты моделирования представлены на рисунке Рисунок 16. Процесс сходящийся, внутренний контур скорости в канале марша устойчив. При малых входных сигналах нелинейность не оказывает влияния.

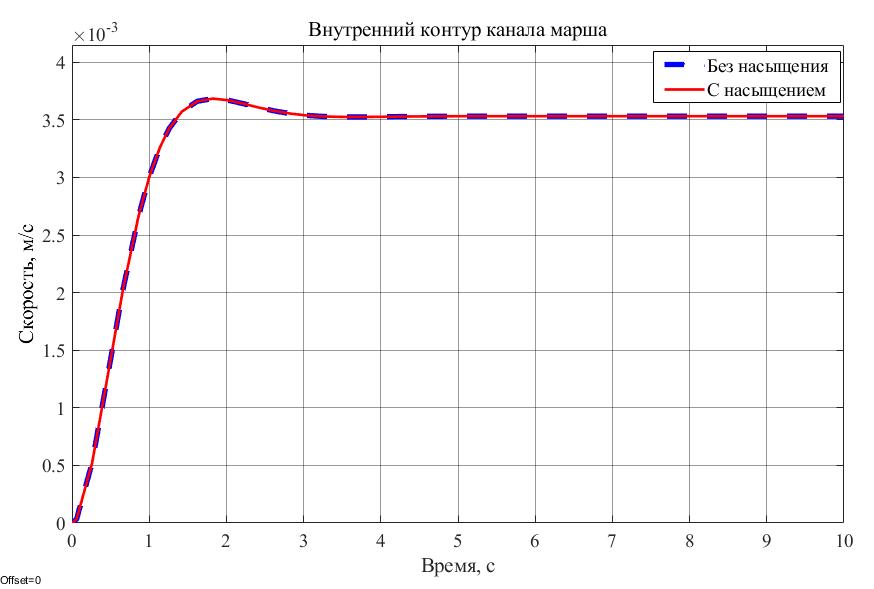


Рисунок 16 – Переходные процессы во внутреннем контуре скорости при задающем воздействии 0,02 м/с

Для определения регулятора К1, находящегося в прямой ветви, воспользуемся частотным методом синтеза [7]. Для этого составим передаточную функцию разомкнутого контура положения.

|  |  |
| --- | --- |
| , где | (19) |

- показатель добротности системы, с-1.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

Для приближённых расчётов примем , тогда ЛАЧХ ПФ (19) будет иметь вид «1-2-3» [7, c. 368]. Для ЛАЧХ такого вида приведены зависимости переходного процесса от двух параметров:

− произведения базовой частоты и времени;

− показателя колебательности.

Базовая частота есть точка пересечения «-1»-й асимптоты с линией нуля децибел. Показатель колебательности есть максимум амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы к амплитуде в начальный момент времени и характеризует склонность системы к колебаниям. В соответствии с рекомендациями [6, 7, c. 381] примем показатель колебательности М равным 1,03. По формуле из [7, c. 373] определим наибольшее значение коэффициента К1.



Подставим (20) в полученное выражение:

.

Промоделируем скорректированный контур марша, структурная схема которого в пакете Matlab Simulink показана на рисунке Рисунок 17.

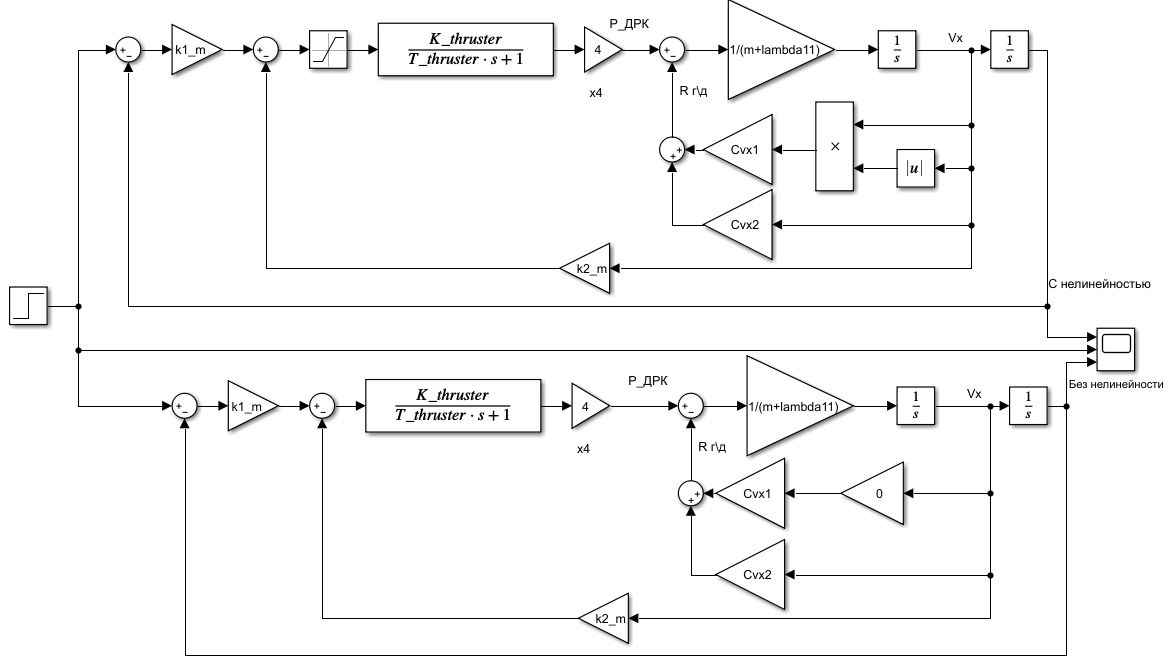


Рисунок 17 – Контур марша АНПА с синтезированными коэффициентами

На рисунке Рисунок 18 показаны переходные процессы при входном ступенчатом воздействии. Полученная система устойчива.

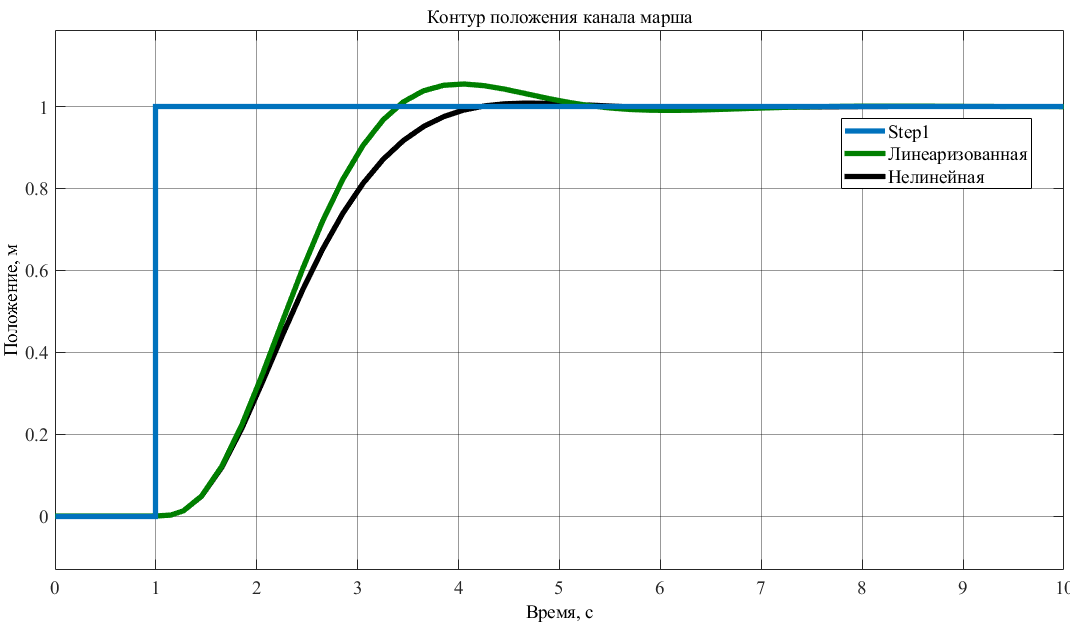


Рисунок 18 – Переходные процессы синтезированного контура положения канала марша при малом задающем воздействии 1 м

Параметры качества переходного процесса приведены в таблице Таблица 4.

Таблица 4 – Значения перегулирования и времени переходного процесса скорректированного контура положения канала марша при малом входном воздействии

|  |  |
| --- | --- |
| Линеаризованный контур | |
| Перерегулирование, % | 5,8 |
| Время переходного процесса, с | 2,42 |
| Контур с учётом нелинейности | |
| Перерегулирование, с | 1,4 |
| Время переходного процесса, % | 5,47 |

## 4.2 Регуляторы контура курса

Аналогично контуру марша, проведём синтез регуляторов К1 и К2 контура курса, структурная схема которого показана на рисунке Рисунок 19.

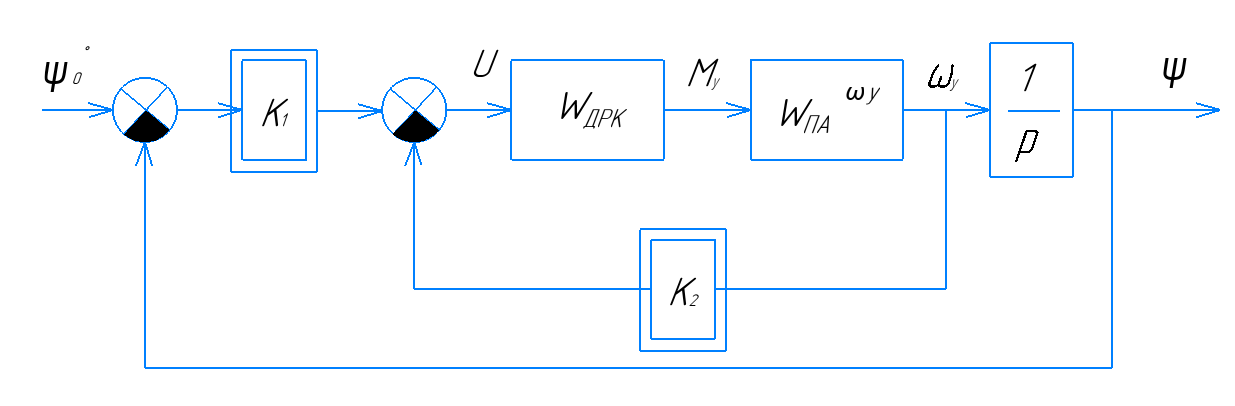


Рисунок 19 – Структурная схема контура курса

Передаточная функция по скорости для контура управления курсом:





С учётом выражений (13) и (14) получим:

, где



Выразим коэффициент демпфированиячерез постоянную времени передаточной функции по скорости:



Из выражения для  выразим коэффициент К2:





После подстановки всех известных параметров получим 

На рисунке Рисунок 20 представлена структурная схема передаточной функции контура скорости канала курса в пакете Matlab Simulink с учётом нелинейности движителей и без неё.

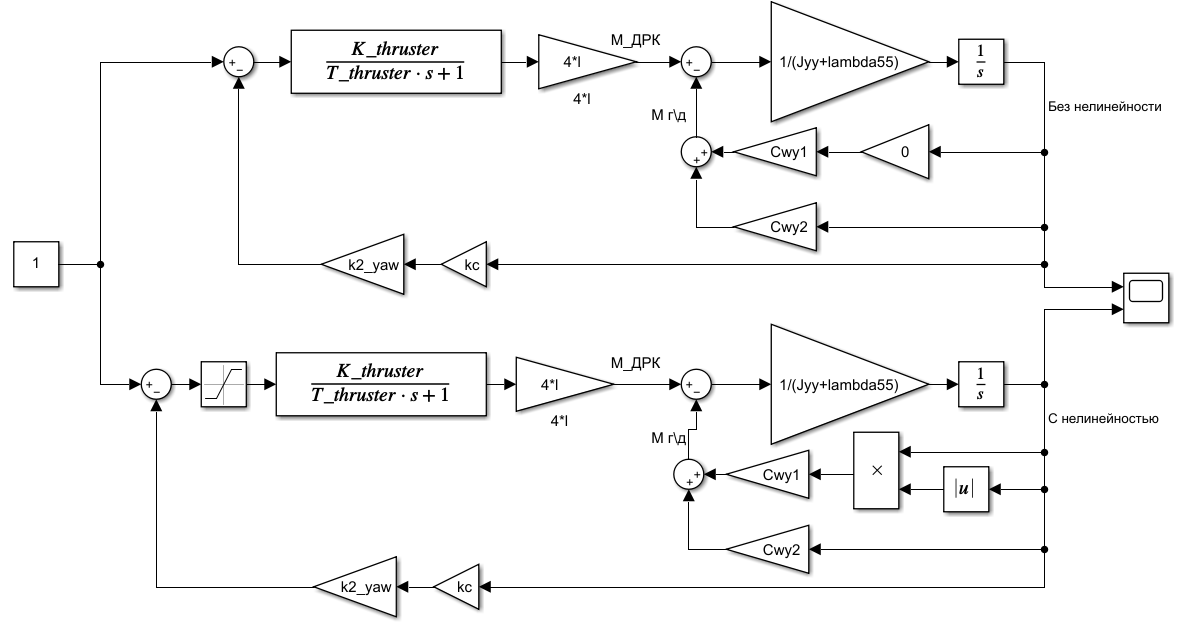


Рисунок 20 – Структурная схема внутреннего контура скорости канала курса

При малом задающем воздействии график переходного процесса, показанный на рисунке Рисунок 21, сходится к постоянному значению, что свидетельствует об устойчивости внутреннего контура скорости.

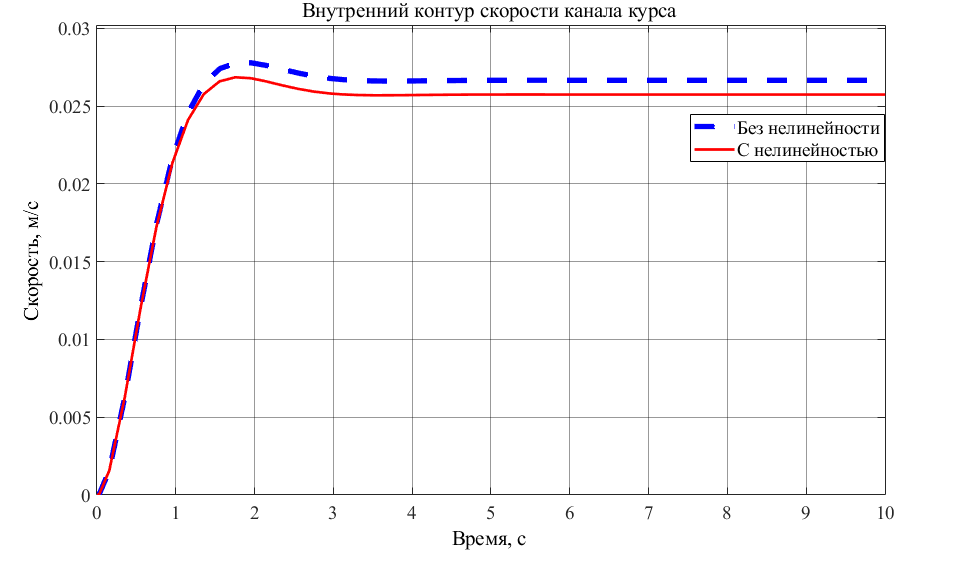


Рисунок 21 – Переходной процесс внутреннего контура скорости канала марша с учётом нелинейности и без неё при входном воздействии 1 º/с

Для определения корректирующего коэффициента в прямой ветви по положению также, как и в предыдущем случае, воспользуемся частотным методом синтеза. Для этого составим передаточную функцию контура положения при повороте по курсу, структурная схема которого показана на рисунке Рисунок 19.



Примем показатель колебательности М равным 1,03.



|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

Структурная схема САУ АНПА по курсу показана на рисунке Рисунок 22.

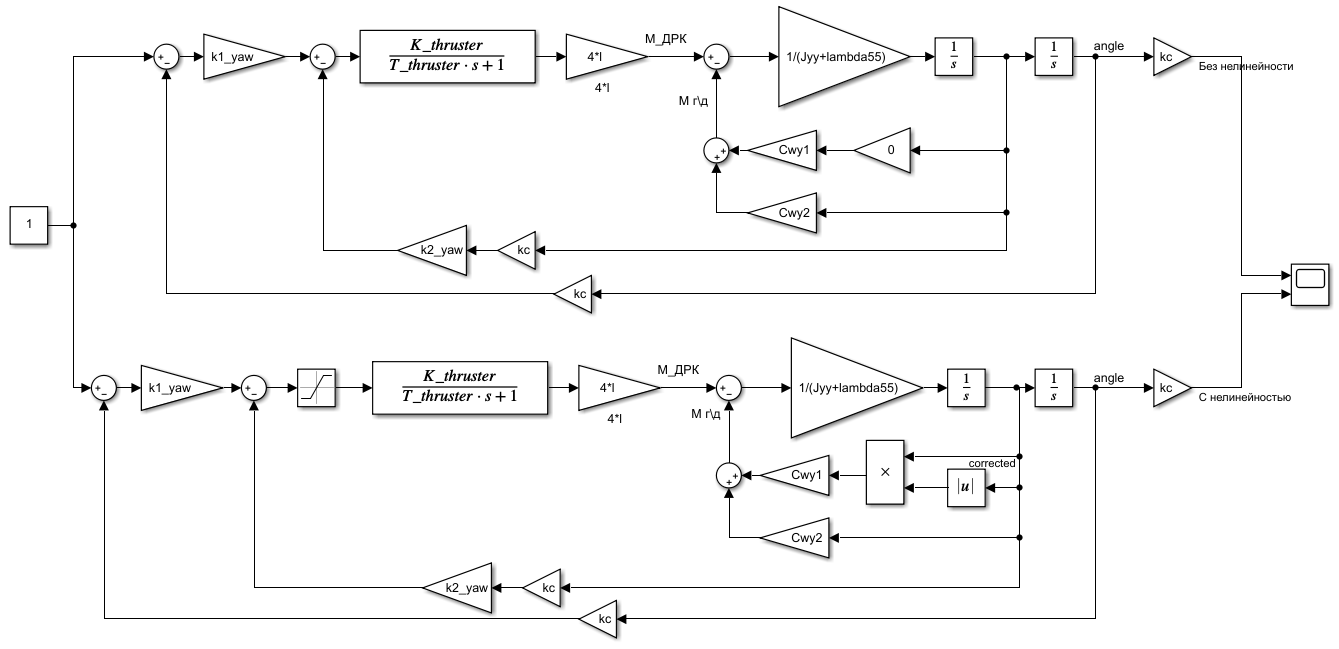


Рисунок 22– Структурные схемы нелинейного и линеаризованного контуров курса

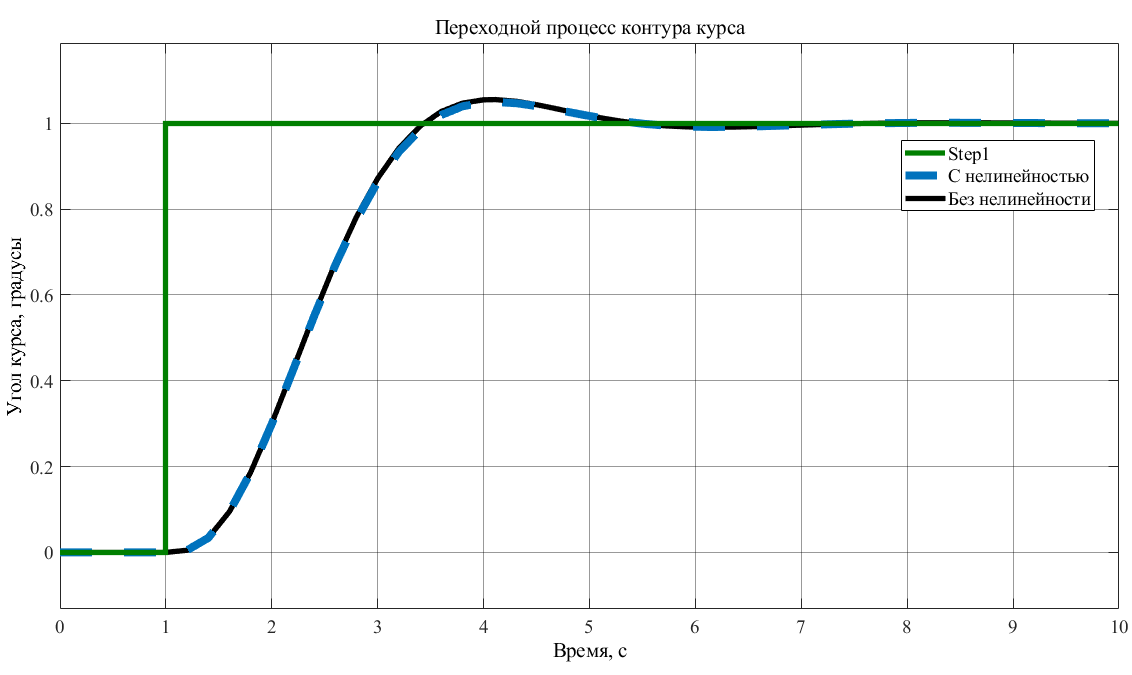


Рисунок 23 – Переходные процессы контура положения канала курса при малом задающем воздействии 1º

Значения перерегулирования и времени переходного процесса представлены в таблице Таблица 5.

Таблица 5 – Значения перегулирования и времени переходного процесса скорректированного контура положения канала курса при малом входном воздействии

|  |  |
| --- | --- |
| Линеаризованный контур | |
| Перерегулирование, % | 5,5 |
| Время переходного процесса, с | 4,3 |
| Контур с учётом нелинейности | |
| Перерегулирование, с | 5 |
| Время переходного процесса, % | 4,1 |

## 4.3 Выводы по разделу 4

В разделе 4 был проведён синтез пропорциональных регуляторов двух локальных контуров: марша и курса, полученные системы промоделированы и определены характеристики переходных процессов для наихудшего с точки зрения устойчивости случая. Значения корректирующих коэффициентов приведены в таблице Таблица 6.

Таблица 6 – Синетзированные регуляторы

|  |  |
| --- | --- |
| Канал марша | |
| Коэффициент усиления в обратной связи контура скорости К2 | 5,32 В∙с/м |
| Коэффициент усиления в прямой ветви контура положения К1 | 4,52 В/м |
| Канал курса | |
| Коэффициент усиления в обратной связи контура скорости К2 | 0,637 В∙с / º |
| Коэффициент усиления в прямой ветви контура положения К1 | 0,515 В / º |

# 5 Исследование контуров

Проверим функционирование разработанных контуров применительно к задаче обхода и стыковки с донной зарядной станцией. В работе [9] предложена траектория, состоящая из двух частей: ломаной линии для осуществления обхода и гладкой кривой для стыковки.

Диаграмма структурной схемы математической модели задания траекторного движения в пакете Matlab Simulink показана на рисунке Рисунок 24.

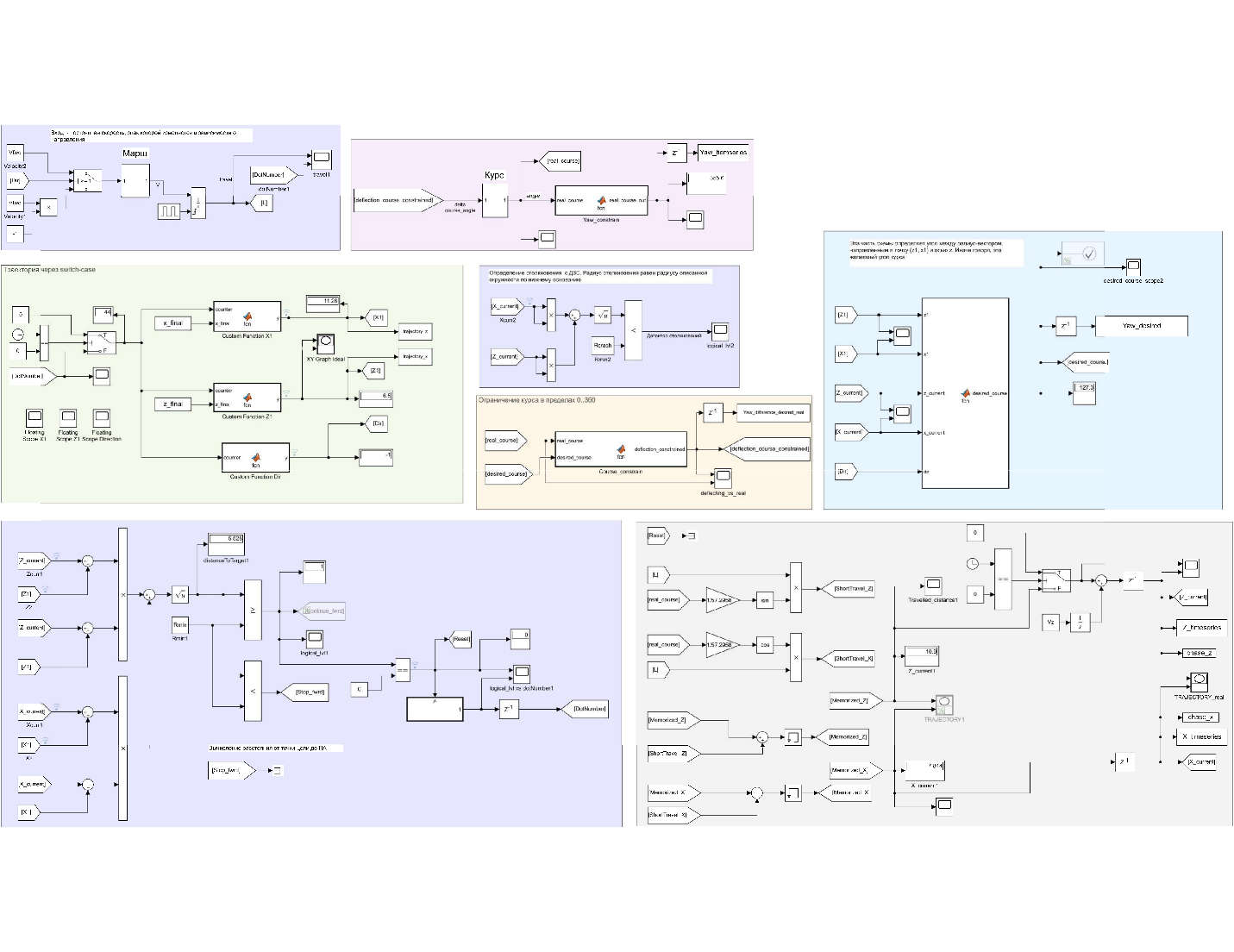


Рисунок 24 – Диаграмма структурной схемы математической модели

Параметры модели АНПА, включая синтезированные коэффициенты и некоторые априорно заданные константы, например, такие как скорость маршевого движения, минимальный радиус определения выхода в точку и другие, приведены в сценарии приложения А. В нём же прописан код для генерации точек траектории.

## 5.1 Исследование траектории обхода

Проведём серию моделирований со скоростями маршевого движения 0,3, 0,8 и 1,3 м/с. Результаты представлены на рисунках 25 – 27.

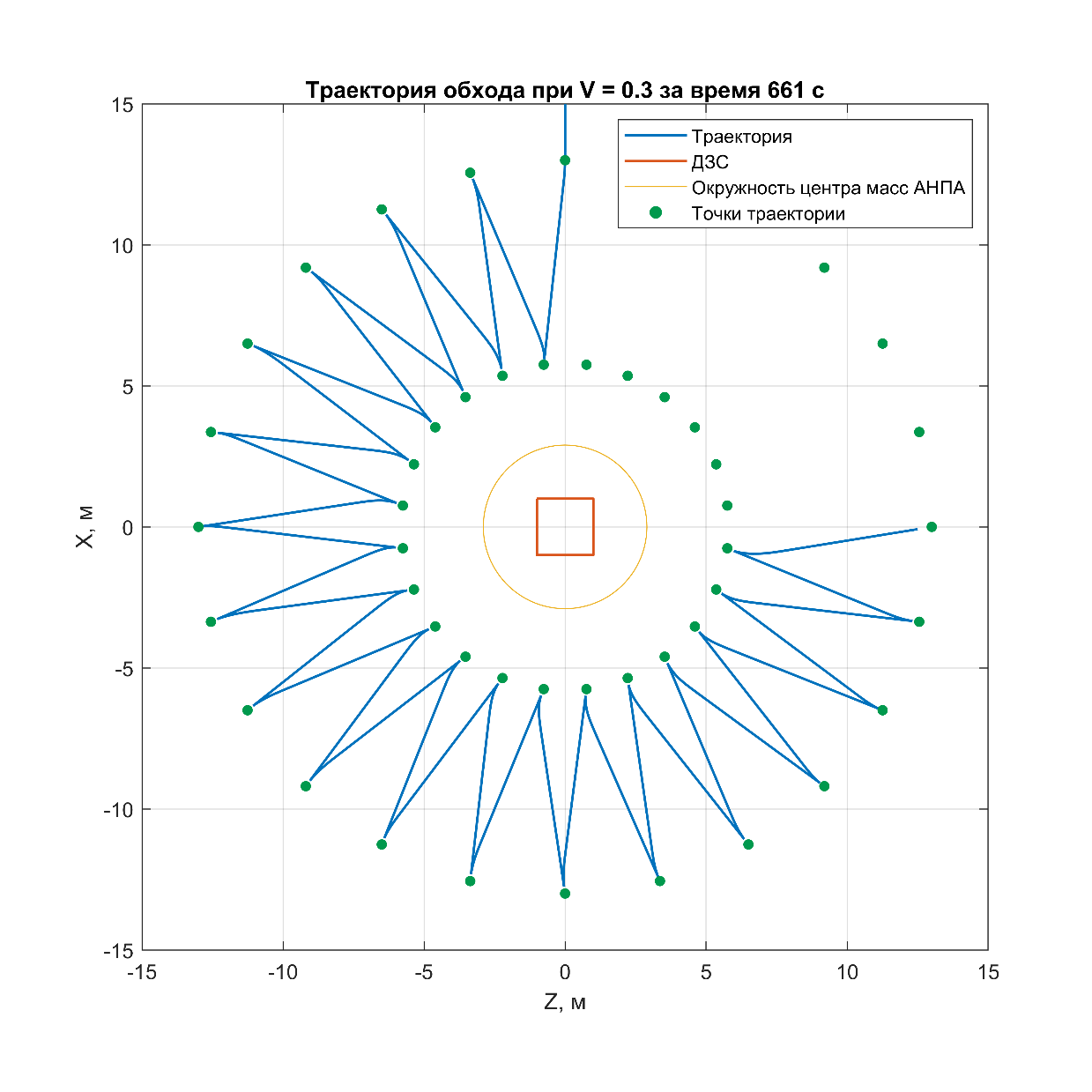


Рисунок 25 – Траектория обхода ДЗС при скорости 0,3 м/с

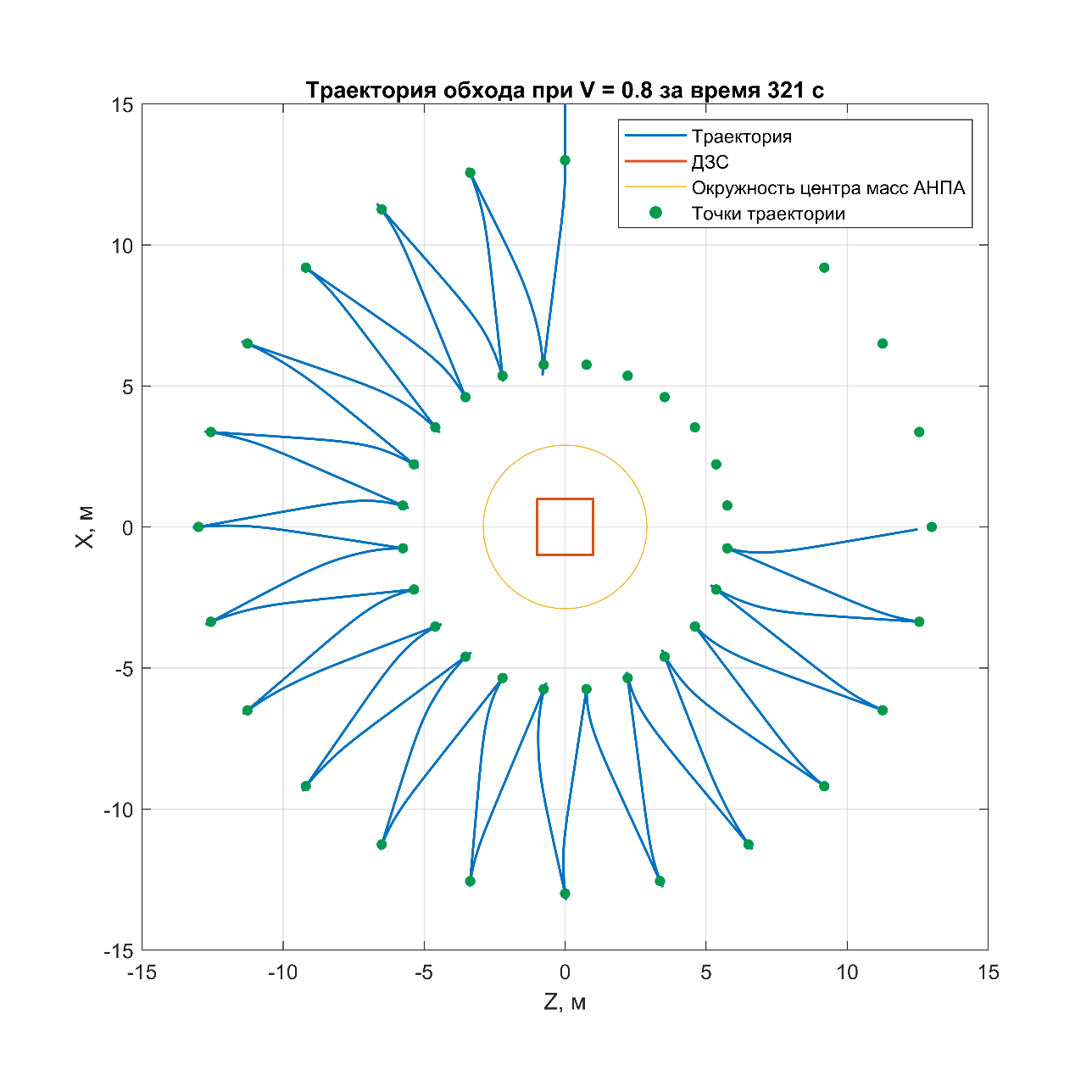


Рисунок 26 – Траектория обхода ДЗС при скорости 0,8 м/с

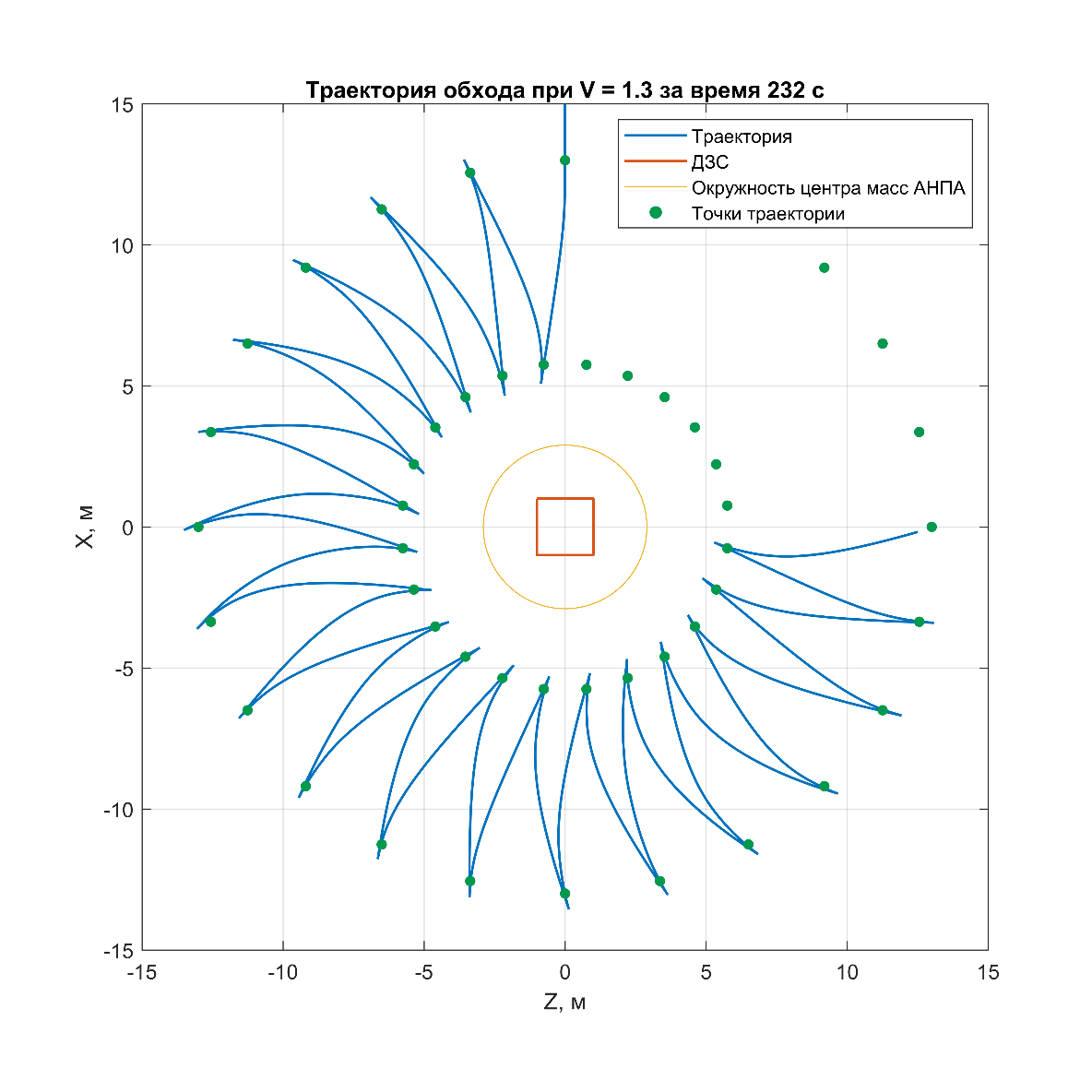


Рисунок 27 – Траектория обхода ДЗС при скорости 1,3 м/с

Для построения графиков выше использовался сценарий для интерпретатора Matlab, приведённый в приложении Б. В заголовках графиков указано также и время, потребовавшееся для выполнения обхода приблизительно на 270º против часовой стрелки из начальной точки с координатами (0, 15). Врямя симуляции было выствлено бесконечным и добавлено условие остановки, показанное на рисунке Рисунок 28.

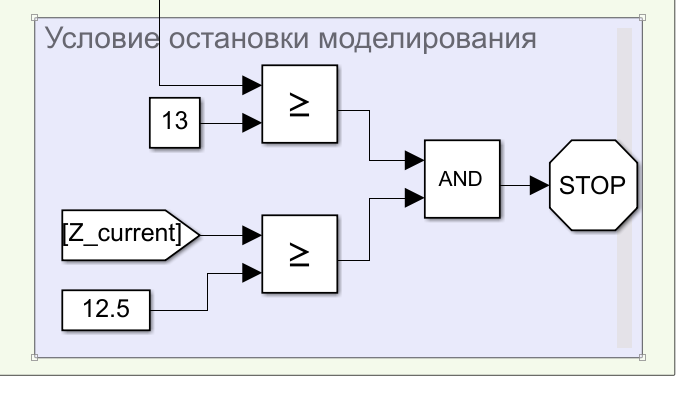


Рисунок 28 –Условие остановки симуляции

Красным квадратом со стороной 2 м обозначено нижнее основание ДЗС. Описанная вокруг окружность представляет собой границу, пересекая которую АНПА сталкнётся с ДЗС. На рисунке Рисунок 29 показаны ограничительные окружности, расчёт и обоснование диаметров которых приведён в [9].

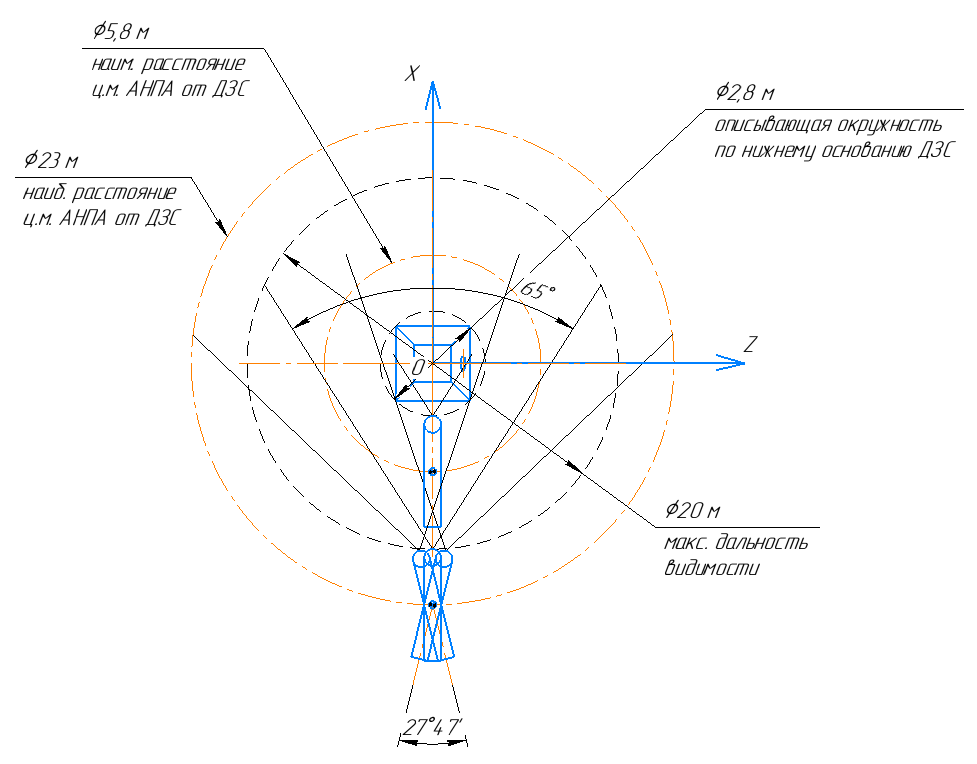


Рисунок 29 – Окружности, ограничивающие маневрирование АНПА при обходе

В данном случае обеспечен существенный запас по минимальному расстоянию от АНПА до ДЗС в процессе обхода.

Исследуем влияние скорости маршевого движения на время обхода. Для этого расширим диапазон моделируемых скоростей и воспользуемся приведённым в приложении сценарием для автоматического запуска моделирования с обновлёнными параметрами. Полученная зависимость приведена на рисунке Рисунок 30.

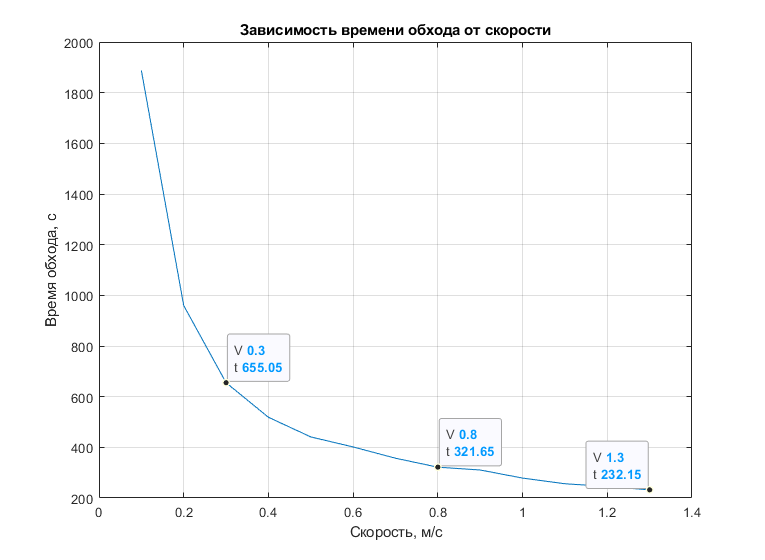


Рисунок 30 – Время выполнения манёвра в зависимости от скорости маршевого движения

Зависимость имеет нелинейный характер, что, очевидно, связано с частыми сменами направления движения АНПА во время обхода.

## 5.2 Выводы по разделу 5

Синтезированные контуры обеспечивают обход донной зарядной станции. С увеличением скорости ухудшается точность следования путевым точкам, появляются нежелательные изгибы прямых участков траектории, которые могут увеличить нагрузку на систему технического зрения или даже приводить к потере объекта из поля зрения камеры.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения курсовой работы был выбран движитель, разработана грубая трёхмерная подводного аппарата, а также определены все недостающие параметры математической модели.

Составленная математическая модель АНПА позволила провести синтез регуляторов контуров курса и марша. Качество полученной системы управления проверено для полной нелинейной модели. Синтезированная система управления совместно с информационно-измерительным комплексом и соответствующим программным обеспечением, включающим в себя алгоритмы технического зрения, позволит выполнить обход донной зарядной станцией и последующую стыковку.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Официальный сайт производителя движителей [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://lianinno.com/underwater-thrusters/ (дата обращения: 26.10.2018, 12:00)
2. Определение гидродинамического сопротивления в пакете Solidworks Flow Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.webpages.uidaho.edu/mindworks/Adv%20Solidworks/CFD/Drag%20coefficient%20of%20sphere%20-%20Final.pdf (дата обращения: 26.10.2018, 12:00)
3. Короткин А.И. Присоединённые массы судна. Справочник. - Л: Судостроение, 1986. – 312с.
4. Пантов Е.Н., Махин Н.Н. Основы теории движения подводных аппаратов. - Л., Судостроение, 1973. – 216 с.
5. Егоров С.А., Молчанов А.В., Обзор алгоритмов локальных контуров управления движением подводных аппаратов. // Наука и образование. – 2001 г. – №8. – с. 1 - 10
6. Егоров С.А., Гладкова О.И., Лекции по курсу «Управление роботами и робототехническими системами».
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
8. Куценко А.С., Егоров С.А. Организация движения телеуправляемого подводного аппарата по заданной траектории. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. № Спец. выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». С. 51–56.
9. Андреев Е.В. Использование системы видеопозиционирования АНПА: НИР/ Андреев Евгений Викторович. – Москва, 2021. – 41 с.

# Приложение А. Сценарий для задания параметров математической модели АНПА

% \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

% \*\*\* Параметры, необходимые для расчёта траектории

% \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

% Диаметры, ограничивающие перемещение центра масс, м

% (см. чертёж)

D\_mass\_center\_max = 13;

D\_mass\_center\_min = 5.8;

% Угол сектора и полный угол, на который планируется повернуть

angular\_delta = 15;

angle = 90;

% Вычислим количесво требуемых секторов

N = fix(360 / angular\_delta);

%disp('class N:'); display(class(N));

% Вектора с координатами

z\_outer = zeros(1, int32(N));

x\_outer = zeros(1, int32(N));

z\_inner = zeros(1, int32(N));

x\_inner = zeros(1, int32(N));

for i=1:N

%disp( class(i) ); disp( i );

[p1\_z, p1\_x] = pol2cart(deg2rad(angle), D\_mass\_center\_max);

[p2\_z, p2\_x] = pol2cart(deg2rad(angle + angular\_delta/2), D\_mass\_center\_min);

%disp(p1\_z); disp(p1\_x);

z\_outer(int32(i)) = p1\_z;

x\_outer(int32(i)) = p1\_x;

z\_inner(int32(i)) = p2\_z;

x\_inner(int32(i)) = p2\_x;

angle = angle + angular\_delta;

end

z\_final = zeros(1, int32(N\*2));

x\_final = zeros(1, int32(N\*2));

direction = zeros(1, int32(N\*2));

j = 1;

for i=1:N

z\_final(j) = z\_outer(i);

x\_final(j) = x\_outer(i);

direction(j) = 1;

j = j + 1;

z\_final(j) = z\_inner(i);

x\_final(j) = x\_inner(i);

direction(j) = -1;

j = j + 1;

end

clear p1\_z p1\_x p2\_z p2\_x i j z\_inner x\_inner z\_outer x\_outer;

%disp(z\_final);

%disp(x\_final);

% \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

% \*\*\* Переменные подводного аппарата

% \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

m = 300; %24.7

Cvx1 = 182.87;

Cvx2 = 33;

lambda11 = 12.72;

Jyy = 366;

Cwy1 = 1144.7;

Cwy2 = 22.52;

lambda55 = 117.08;

P1 = 60 \* 9.81; % = 588 H, упор одного движителя

U1 = 24; % В, напряжение

% Для ПФ одного винтомотора

K\_thruster = P1 / U1; % = 24.5 H/B;

T\_thruster = 0.3; % с

l = 0.225;

% Коэффициенты, которые необходимо синтезировать

k1\_m = 4.5227;

k2\_m = 5.32;

% Коэффициенты, которые необходимо синтезировать

k1\_yaw = 0.5146;

k2\_yaw = 0.6370;

% коэффициент перевода из радиан в градусы

kc = 57.2958;

%Зададим скорость движения по маршу

Vfwd = 1.3;

%Радуис столкновения == описанной окружности по нижнему основанию

Rcrash = sqrt(2);

% Радиус точки траектории

Rmin = 0.4;

%Течение направлено вдоль оси Z

Vz = 0;

%Vz = 0.1;

%Vz = 0.2;

# Приложение Б. Сценарий для построения графиков траектории

% https://www.mathworks.com/help/matlab/creating\_plots/add-title-axis-labels-and-legend-to-graph.html

% https://www.mathworks.com/help/matlab/titles-and-labels.html

% https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/grid.html

% https://www.mathworks.com/help/matlab/creating\_plots/aspect-ratio-for-2-d-axes.html

% https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/487061-how-to-change-the-size-of-a-plot-figure

%

%Извлечём время симуляции

total\_time = Z\_timeseries.Time(end) %chaze\_z(end)

total\_time = int16(fix(total\_time));

display(total\_time);

% Траектория

plot(chase\_z, chase\_x, 'LineWidth', 1.2)

hold on

% Станция

St\_x = [-1 1 1 -1 -1];

St\_y = [1 1 -1 -1 1];

plot(St\_x, St\_y, 'LineWidth', 1.2)

% Окружность, за которую нельзя заходить

% 2\*sqrt(2) / 2 + 3/2 = 2,9

r = 5.8 / 2;

th = 0:pi/50:2\*pi;

xunit = r \* cos(th) + 0;

yunit = r \* sin(th) + 0;

h = plot(xunit, yunit);

% Точки траектории

scatter\_color = [0, 0.6, 0.3];

scatter(z\_final, x\_final, 25, scatter\_color, 'filled');

%plot(z\_final, x\_final)

pbaspect([1 1 1])

x0=1000;

y0=100;

width=700;

height=700;

set(gcf,'position',[x0,y0,width,height])

grid on

title( ['Траектория обхода при V = ', num2str(Vfwd), ' за время ', num2str(total\_time), ' c' ] )

xlabel('Z, м')

ylabel('X, м')

legend({'Траектория','ДЗС', 'Окружность центра масс АНПА', 'Точки траектории'},'Location', 'northeast')%'southwest')

hold off

print('-dpng','-r600', [ num2str(Vfwd), '.png'])

# Приложение В. Сценарий для автоматического запуска моделирования с различными скоростями движения

Research\_ = struct;

Research\_.N\_iters = 13;

Research\_.times = zeros(1, int32(Research\_.N\_iters));

Research\_.velocities = 0.1:0.1:1.3;

for i=1:Research\_.N\_iters

display(i);

%Vfwd = i \* 0.1;

Vfwd = Research\_.velocities(i);

%display(Vfwd);

sim('like\_a\_star\_1' , inf);

Research\_.total\_time = Z\_timeseries.Time(end);

Research\_.times(i) = Research\_.total\_time;

end

plot(Research\_.velocities, Research\_.times);

grid on

title( ['Зависимость времени обхода от скорости' ] )

xlabel('Скорость, м/с')

ylabel('Время обхода, с')