



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 \_\_\_\_\_

—

*фамилия, имя, отчество*

Группа \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_

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)**

**З А Д А Н И Е**  
**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

<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>4</b>
1 Техническое задание .....	7
2 Определение параметров математической модели .....	9
2.1 Выбор движителя .....	9
2.2 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при движении по маршруту.....	12
2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу .....	14
2.4 Определение присоединённых масс .....	14
2.5 Определение моментов инерции аппарата .....	16
2.6 Выводы по разделу 2 .....	17
3 Математические модели движения АНПА «МТ-2010».....	18
3.1 Передаточные функции движительно-рулевого комплекса .....	20
3.2 Передаточная функция АНПА при движении по маршруту .....	21
3.3 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу .....	23
3.4 Выводы по разделу 3 .....	26
4 Синтез регуляторов .....	27
4.1 Регуляторы контура марша .....	28
4.2 Регуляторы контура курса .....	34
4.3 Выводы по разделу 4 .....	39
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>41</b>

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АКБ – аккумуляторная батарея;

ПА – подводный аппарат;

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;

ВМА – винтомоторный агрегат;

ДРК – движительно-рулевой комплекс;

СКУ – система контроля и управления.

## 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 маршру, 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 (что?)

Задачи:

- 
- 
-

## 1 Техническое задание

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



Рисунок 1 – АНПА МТ-2010

Тактико-технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Тактико-технические характеристики МТ-2010

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

1. Составить математическую модель движения АНПА по маршруту и курсу;
2. Определить все недостающие параметры для синтеза СУ
3. Ввести корректирующие устройства.
4. Промоделировать полученные контуры управления;



## 2 Определение параметров математической модели

### 2.1 Выбор движителя

Для построения математической модели движения АНПА необходимо выбрать движитель. Выберем винтомоторный агрегат 049-Е 120-100 высокоэффективной серии, показанный на рисунке 2, от китайского производителя Lian [1].

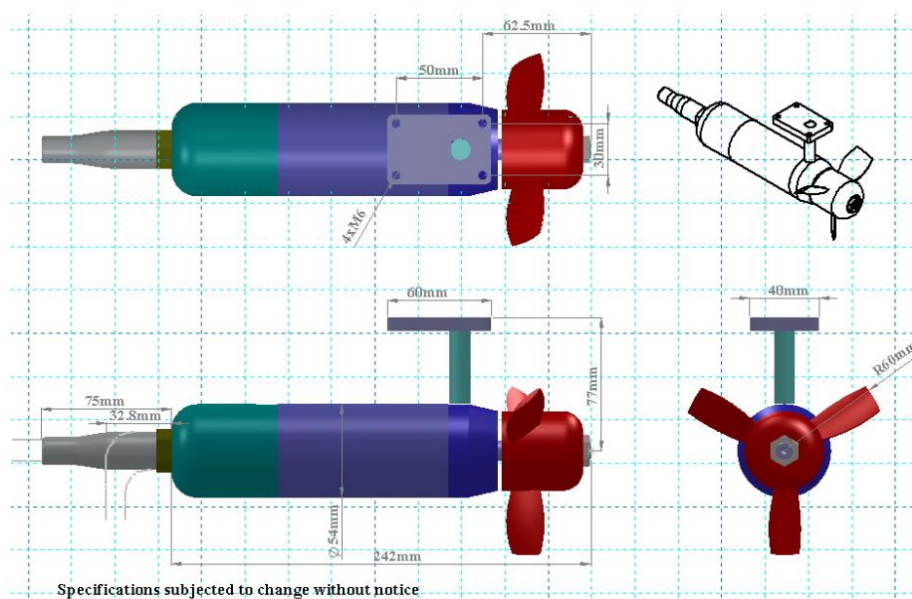


Рисунок 2 – Внешний вид винтомоторного агрегата 049-Е 120-100

Параметры выбранного движителя представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры движителя 049-Е 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:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + K_e \cdot \omega_{\text{дв}}, \text{ где}$$

$U$  – напряжение, подаваемое на движитель, В;

$i$  – ток движителя, А,

$R$  – сопротивление обмоток движителя, Ом,

$L$  – индуктивность обмоток движителя, Гн,

$K_e$  – коэффициент противоЭДС, В,

$\omega_{\text{дв}}$  – угловая скорость вращения вала движителя  $\text{с}^{-1}$ .

Уравнения момента могут быть представлены как:

$$M_{\text{дв}} = iK_m,$$

где  $K_m$  – коэффициент момента движителя,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$ ;

$$M_{\text{дв}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} + K_{\text{гв}} \omega_{\text{дв}} |\omega_{\text{дв}}|,$$

$J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции движителя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$K_{\text{гв}}$  – коэффициент гребного винта,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

По приведённым выше уравнениям составим структурную схему движителя, показанную на рисунке 3.

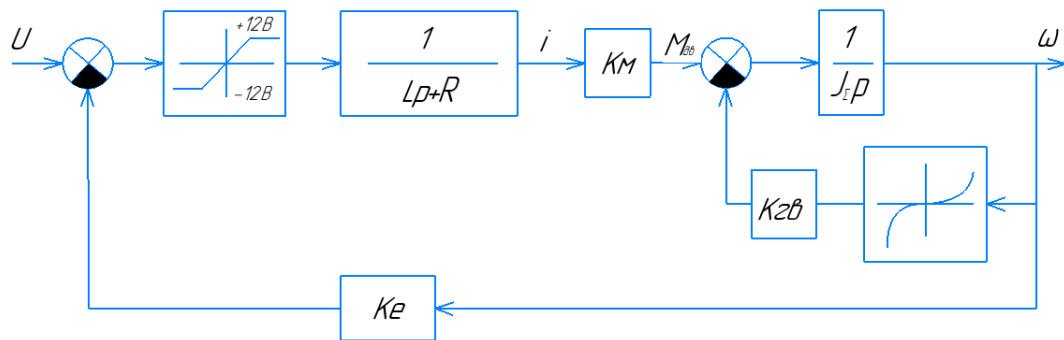


Рисунок 3 – Нелинейная структурная схема движителя

Движитель является покупным устройством и представляет собой совокупность электродвигателя и гребного винта. Передаточную функцию движителя  $W_{\text{дв}}(p)$  представим апериодическим звеном с коэффициентом усиления  $K_{\text{дв}}$ , а постоянную времени  $T_{\text{дв}}$  примем равной 0,3 с, поскольку небольшой ВМА обладает малой инерцией.

Итоговое уравнение динамики движителя:

$$T_{\text{дв}} \frac{dP_1}{dt} + P_1 = K_{\text{дв}} U,$$

а передаточная функция примет вид:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{P_1(p)}{U(p)} = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}} p + 1}, \quad (1)$$

где

$U$  – напряжение, В,

$P_1 = 60 \cdot 9,81 = 588,4$  – тяга одного движителя, Н,

$T_{\text{дв}} = 0,3$  – постоянная времени движителя, с,

$K_{\text{дв}} = \frac{588}{24} = 24,5$  – 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 4.

Параметры, указанные при создании проекта:

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

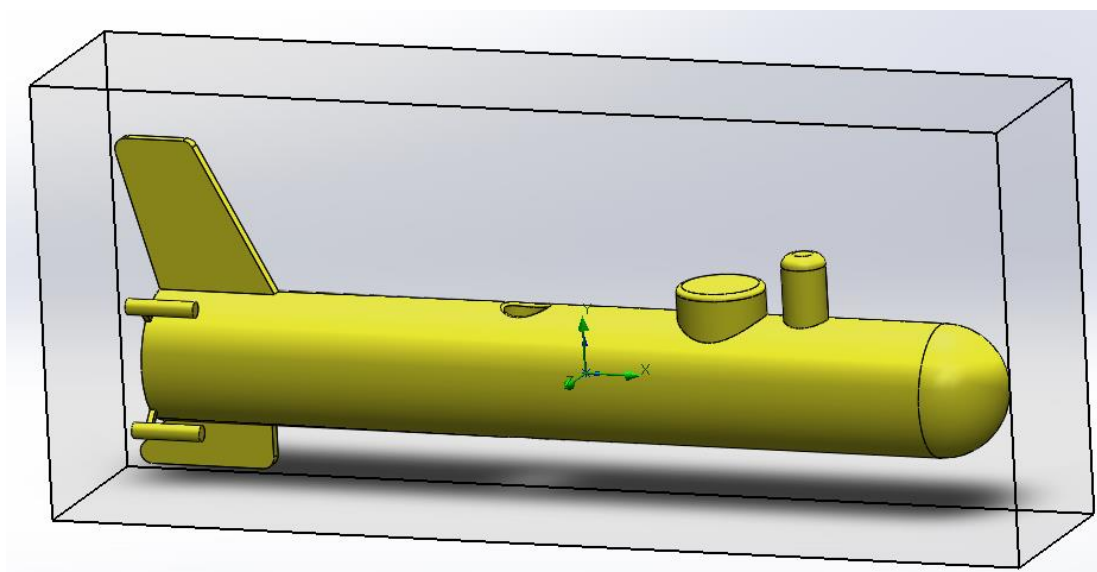


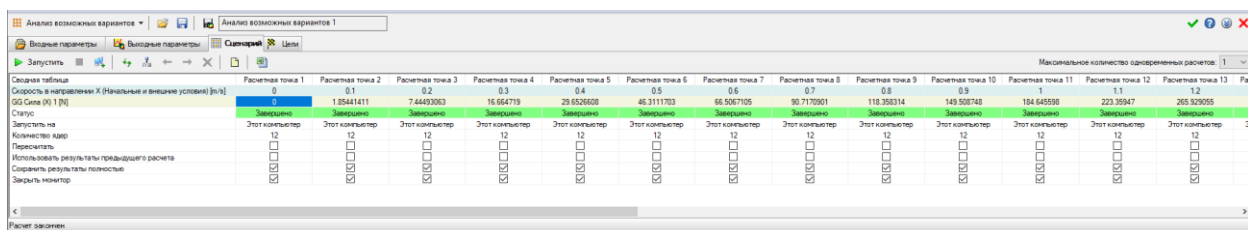
Рисунок 4 – Расчётная область

В созданном проекте в разделе «Новое параметрическое исследование» в качестве параметра указываем значения скорости вдоль базовой оси X в виде таблицы как на рисунке 5.

Параметр	Текущее значение	Способ варьирования	#	Значения
Скорость в направлении X (Начальные и внешние условия)	0 m/s	Диапазон и шаг между значениями	26	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5

Рисунок 5 – Табличное задание параметра

В качестве выходного параметра указываем значение силы вдоль оси X. Результаты расчёта представлены на рисунке 6.



Расчетная точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Скорость в направлении X (Начальные и внешние условия) [m/s]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
GG Сила (F <sub>x</sub> ) [N]	0	1.8541411	7.4443063	16.664719	29.652608	46.3111703	66.506705	90.7170901	118.358314	149.508748	184.645588	223.35947	265.92055
Статус	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено	Завершено
Запустить на	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер	Этот компьютер
Количество шагов	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Пересчитать	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Использовать результаты предыдущего расчета	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Сохранить результаты полностью	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Закрыть монитор	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рисунок 6 – 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 V<sub>x</sub> (рисунок 7).



Рисунок 7 – Аналитическая зависимость силы гидродинамического сопротивления от скорости набегающего потока

Таким образом, выявленная зависимость имеет вид:

$$R_x = C_{Vx1} \cdot V^2 + C_{Vx2} \cdot V, \text{ где} \quad (2)$$

$$C_{Vx1} = 182,87 \frac{\text{кг}}{\text{м}},$$

$$C_{Vx2} = 33,012 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

### 2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу

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

$$M_y = C_{\omega y1} \cdot \omega_y^2 + C_{\omega y2} \cdot \omega_y, \text{ где} \quad (3)$$

$$C_{\omega y1} = 1144,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_{\omega y2} = 22,52 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}.$$

### 2.4 Определение присоединённых масс

Для составления математической модели АНПА при движении по маршруту определим коэффициент присоединённых масс  $\lambda_{11}$ . Для его нахождения воспользуемся методом эквивалентного эллипсоида, описанным

в [3]. Для начала необходимо определить полуоси  $a$ ,  $b$  и  $c$  эквивалентного эллипсоида, показанные на рисунке 8.

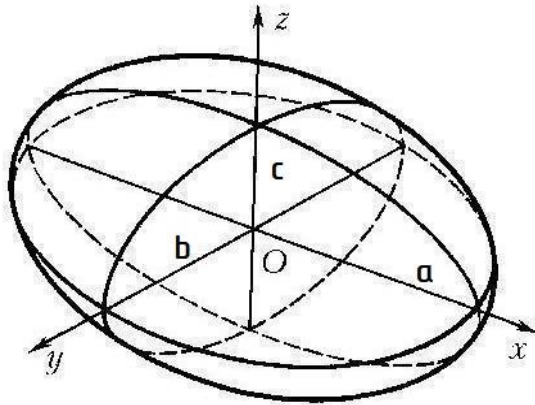


Рисунок 8 – Расположение полуосей эллипсоида

$$a = \frac{L}{2} = 1,5 \text{ м}, b = c = \frac{D}{2} = 0,225 \text{ м, где}$$

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

Отношение  $b/a = 0,15$ . Тогда по графикам на рисунке 9 определим  $k_{11} = 0,04$  и  $k_{55} = 0,8$ .

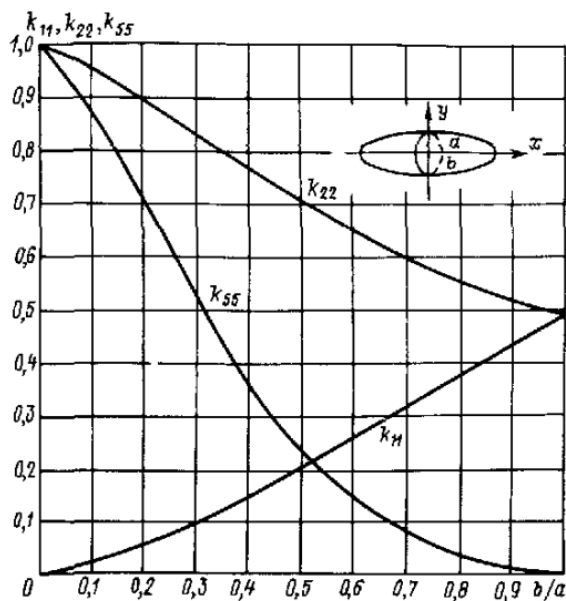


Рисунок 9 – Графики коэффициентов присоединённых масс

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

$$\lambda_{11} = \frac{4}{3} \pi r a b^2 \cdot k_{11} = \frac{4}{3} \cdot 3,1416 \cdot 1025 \cdot 1,5 \cdot 0,225^2 \cdot 0,04 = 12,72 \text{ кг.}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{55} &= \frac{4}{15} \pi r a b^2 (a^2 + b^2) \cdot k_{55} = \\ &= \frac{4}{15} 3,1416 \cdot 1025 \cdot 1,5 \cdot 0,225^2 \cdot (1,5^2 + 0,225^2) \cdot 0,8 = 117,08 \text{ кг.} \end{aligned}$$

## 2.5 Определение моментов инерции аппарата

Для построения математической модели АНПА при повороте по курсу требуется определить момент инерции  $J_{yy}$ . По данным таблицы 1 найдём объём аппарата:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L = \frac{\pi 0,45^2}{4} \cdot 3 = 0,47 \text{ м}^3, \text{ где}$$

$d$  – диаметр АНПА,

$L$  – длина по габаритам.

Определим среднюю плотность аппарата:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{300 \text{ кг}}{0,47 \text{ м}^3} = 638 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ что много меньше плотности воды и не}$$

удовлетворяет условию нулевой плавучести.

В Solidworks в качестве материала выберем воду и рассчитаем момент инерции вокруг вертикальной оси как  $J_{yy} = 366 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .



## 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 3.

Таблица 3 – Определённые параметры математической модели

Параметр	Значение
Тяга одного движителя	$P_1 = 588,4 \text{ Н}$
Постоянная времени движителя	$T_{\partial\theta} = 0,3 \text{ с}$
Коэффициент усиления движителя	$K_{\partial\theta} = 24,5 \text{ Н/В}$
Квадратичный коэффициент гидродинамического сопротивления при движении по маршу	$C_{Vx1} = 182,87 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$
Линейный коэффициент гидродинамического сопротивления при движении по маршу	$C_{Vx2} = 33,012 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$
Квадратичный коэффициент гидродинамического сопротивления при повороте по курсу	$C_{\omega y1} = 1144,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Линейный коэффициент гидродинамического сопротивления при повороте по курсу	$C_{\omega y2} = 22,52 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$
Коэффициент присоединённых масс $\lambda_{11}$	12,72 кг
Коэффициент присоединённых масс $\lambda_{55}$	117,08 кг
Момент инерции аппарата вокруг вертикальной оси $J_{yy}$	366 кг · м <sup>2</sup> .

### 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]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\vec{Q} + \vec{Q}^*) + \vec{\omega} \times (\vec{Q} + \vec{Q}^*) = \vec{R}, \\ \frac{d}{dt}(\vec{L} + \vec{L}^*) + \vec{\omega} \times (\vec{L} + \vec{L}^*) + \vec{V} \times (\vec{Q} + \vec{Q}^*) = \vec{M}, \end{cases}$$

где  $\vec{Q}, \vec{Q}^*$  – векторы количества движения тела и жидкости, вовлекаемой в движение, соответственно;  $\vec{L}, \vec{L}^*$  – векторы моментов количества движения тела и жидкости относительно начала координат связанной системы соответственно;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости тела;  $\vec{V}$  – вектор скорости начала связанной системы координат;  $\vec{R}, \vec{M}$  – главный вектор и главный момент относительно начала координат внешних сил, действующих на аппарат.

Уравнения движения АНПА в проекциях на связанные оси координат (см. рисунок 4), с учётом того, что плоскость Оху является плоскостью симметрии аппарата, и присоединённые массы  $\lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{36}, \lambda_{46}$  и  $\lambda_{56}$  равны нулю, принимают вид:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} + \lambda_{12} \frac{dV_y}{dt} + (\lambda_{16} - my_G) \frac{d\omega_z}{dt} + \\ + \omega_y [(m + \lambda_{33}) V_z + (\lambda_{34} + my_G) \omega_x + (\lambda_{35} - my_G) \omega_y] - \\ - \omega_z [(m + \lambda_{22}) V_y + \lambda_{12} V_x + (\lambda_{26} + my_G) \omega_z] = R_x, \end{aligned}$$

$$\lambda_{12} \frac{dV_x}{dt} + (m + \lambda_{22}) \frac{dV_y}{dt} + (\lambda_{26} + my_G) \frac{d\omega_z}{dt} + \\ + \omega_z [(m + \lambda_{11})V_x + \lambda_{12}V_y + (\lambda_{16} - my_G)\omega_z] - \\ - \omega_x [(m + \lambda_{33})V_z + (\lambda_{34} + my_G)\omega_x + (\lambda_{35} - mx_G)\omega_y] = R_y,$$

$$(m + \lambda_{33}) \frac{dV_z}{dt} + (\lambda_{34} + my_G) \frac{d\omega_x}{dt} + (\lambda_{35} - mx_G) \frac{d\omega_y}{dt} + \\ + \omega_x [(m + \lambda_{22})V_y + \lambda_{12}V_x + (\lambda_{26} + mx_G)\omega_z] - \\ - \omega_y [(m + \lambda_{11})V_x + \lambda_{12}V_y + (\lambda_{16} - my_G)\omega_z] = R_z,$$

$$(\lambda_{34} + my_c) \frac{dV_z}{dt} + (J_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} + (\lambda_{45} - J_{xy}) \frac{d\omega_y}{dt} + \\ + \omega_y [(J_{zz} + \lambda_{66})\omega_z + (\lambda_{16} - my_G)V_x + (\lambda_{26} + mx_G)V_y] - \\ - \omega_z [(J_{yy} + \lambda_{55})\omega_y + (\lambda_{45} - J_{xy})\omega_x + (\lambda_{35} - mx_G)V_z] + \\ + V_y [(\lambda_{34} + my_G)\omega_x + (\lambda_{35} - mx_G)\omega_y] - \\ - V_z [\lambda_{12}V_x + (\lambda_{26} + mx_G)\omega_z] = M_x,$$

$$(\lambda_{35} - mx_c) \frac{dV_z}{dt} + (\lambda_{45} - J_{xy}) \frac{d\omega_x}{dt} + (J_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} + \\ + \omega_z [(J_{xx} + \lambda_{44})\omega_x + (\lambda_{45} - J_{xy})\omega_y + (\lambda_{34} - my_G)V_z] - \\ - \omega_x [(J_{zz} + \lambda_{66})\omega_z + (\lambda_{16} - my_G)V_x + (\lambda_{26} + mx_G)V_y] + \\ + V_z [\lambda_{12}V_y + (\lambda_{16} - my_G)V_z] - \\ - V_z [(\lambda_{34} - my_G)\omega_x + (\lambda_{35} + mx_G)\omega_y] = M_y,$$

$$(\lambda_{16} - my_G) \frac{dV_x}{dt} + (\lambda_{26} + mx_G) \frac{dV_y}{dt} + (J_{zz} + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + \\ + \omega_x [(J_{yy} + \lambda_{55})\omega_y + (\lambda_{45} - J_{xy})\omega_x + (\lambda_{35} - mx_G)V_z] - \\ - \omega_y [(J_{xx} + \lambda_{44})\omega_x + (\lambda_{45} - J_{xy})\omega_y + (\lambda_{34} - my_G)V_z] + \\ + (\lambda_{26} + mx_G)V_x\omega_z - (\lambda_{16} - my_G)V_y\omega_z = M_z,$$

где  $\lambda_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, 6$ ,  $j = 1, \dots, 6$  - присоединённые массы аппарата [3, 4],

$V_x, V_y, V_z$  - проекции вектора  $\vec{V}$  на связанные оси,  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  - проекции вектора  $\vec{\omega}$  на связанные оси,  $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$  - осевые моменты инерции аппарата,  $J_{xy}$  - центробежный момент инерции аппарата,  $x_G, y_G$  - 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:  $l = D / 2 = 0,225$  м. Тогда передаточная функция ДРК АНПА при движении по маршруту в соответствии с (1) примет вид:

$$W_{\text{ДРКх}} = \frac{P_{\text{ДРКх}}(p)}{U_x(p)} = 4 \cdot W_{\text{дв}}(p) = \frac{K_{\text{ДРКх}}}{T_{\text{ДРК}}p + 1}, \quad (4)$$

где

$P_{\text{ДРКх}}$  – тяга ДРК, Н,

$W_{\text{дв}}$  – передаточная функция одного движителя,

$K_{\text{ДРКх}} = 24,5 \cdot 4 = 98$  – коэффициент усиления движительно-рулевого комплекса, Н/В,

$T_{\text{ДРК}} = 0,3$  – постоянная времени движительно-рулевого комплекса, с.

Передаточная функция ДРК АНПА при повороте по курсу:

$$W_{\text{ДРКψ}} = \frac{M_{\text{ДРКψ}}(p)}{U_{\psi}(p)} = 4W_{\text{дв}}(p) \cdot l = \frac{K_{\text{ДРКψ}}}{T_{\text{ДРК}}p + 1}, \quad (5)$$

где

$M_{ДРКу}$  - суммарный момент ДРК, Н·м;

$K_{ДРКψ} = 4 \cdot 0,255 \cdot 24,5 = 22,05$  – коэффициент усиления движительно-рулевого комплекса канала курса, Н·м/В.

### 3.2 Передаточная функция АНПА при движении по маршруту

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 ( $\omega_x = \omega_z = 0$ );
3. Осуществляем сепаратное управления контурами марша и курса, поэтому взаимовлиянием каналов можем пренебречь.

Будем рассматривать движение аппарата по маршруту и поворот по курсу. Таким образом, приведённая выше система уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} = P_{ДРКx} - R_x + F_{возм}, \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} = M_{ДРКy} - M_y + M_{возм}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $P_{ДРКx}$  – суммарная тяга ДРК АНПА,  $R_x$  – сила гидродинамического сопротивления,  $F_{возм}$  – возмущающая сила,  $M_{ДРКy}$  – суммарный момент ДРК,  $M_y$  – гидродинамический момент сопротивления, действующий на аппарат,

$M_{\text{возм}}$  – возмущающий момент.  $F_{\text{возм}}$  и  $M_{\text{возм}}$  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:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} = P_{\text{ДРК}_x} - C_{Vx1} \cdot V_x \cdot |V_x| - C_{Vx2} \cdot V_x + F_{\text{возм}}, \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} = M_{\text{ДРК}_y} - C_{\omega 1} \omega_y \cdot |\omega_y| - C_{\omega 2} \omega_y + M_{\text{возм}}. \end{cases} \quad (7)$$

Представим первое уравнение системы (7) в виде структурной схемы как показано на рисунке 10.

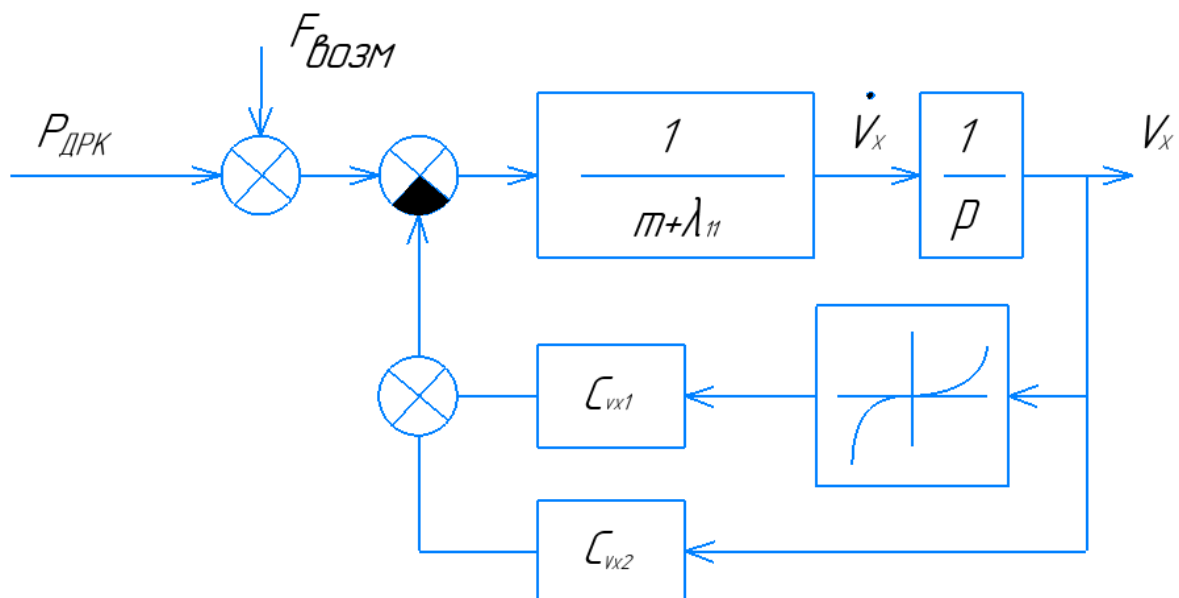


Рисунок 10 – Структурная схема управления маршевой скоростью АНПА с нелинейностью от сил гидродинамического сопротивления

Зададим скорость обхода донной зарядной станции во время стыковки  $V_x^* = 0,2$  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

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{d}{dV_x} \left[ C_{vx1} \cdot V_x^2 + C_{vx2} \cdot V_x \right]_{V_x=V_x^*=0,7} V_x = \\ &= (2C_{vx1} \cdot V_x^* + C_{vx2}) V_x = 106,16 \cdot V_x. \end{aligned} \quad (8)$$

Получим передаточную функцию канала маршевой скорости.

$$W_{ПА}^{V_x} = \frac{V_x(p)}{P_{ДРКx}(p)} = \frac{1}{1 + \frac{(m + \lambda_{11})p}{2C_{vx1}V_x^* + C_{vx2}}} = \frac{K_{vx}}{T_{vx}p + 1}, \quad (9)$$

где

$$K_{vx} = \frac{1}{2C_{vx1}V_x^* + C_{vx2}} = 0,03 \frac{\text{с}}{\text{кг}} - \text{коэффициент усиления канала} \quad (10)$$

марша,

$$T_{vx} = \frac{m + \lambda_{11}}{2C_{vx1}V_x^* + C_{vx2}} = 9,48 \text{ с} - \text{постоянная времени канала марша.} \quad (11)$$

### 3.3 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу

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

$$(J_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} = M_{ДРКy} - C_{\omega y1} \omega_y \cdot |\omega_y| - C_{\omega y2} \omega_y + M_{возм}. \quad (12)$$

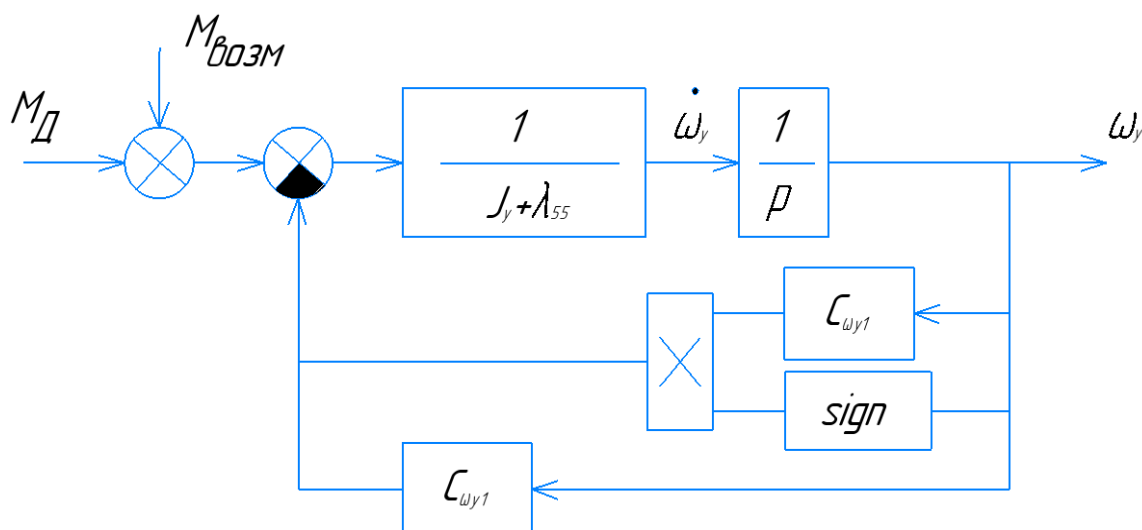


Рисунок 11 – Нелинейная структурная схема канала курса

Проведём линеаризацию разложением в ряд Тейлора с последующим отбрасыванием слагаемых со степенью два и выше в окрестности скорости  $\omega_y^* = 0$  уравнения (12). В итоге получим:

$$M_y = C_{\omega y 1} \omega_y \cdot |\omega_y| + C_{\omega y 2} \omega_y = (2C_{\omega y 1} \omega_y^* + C_{\omega y 2}) \cdot \omega_y \text{ и}$$

$$(J_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} = M_{ДПКу} - (2C_{\omega y 1} \omega_y^* + C_{\omega y 2}) \cdot \omega_y + M_{возм}.$$

Структурная схема показана на рисунке 12.



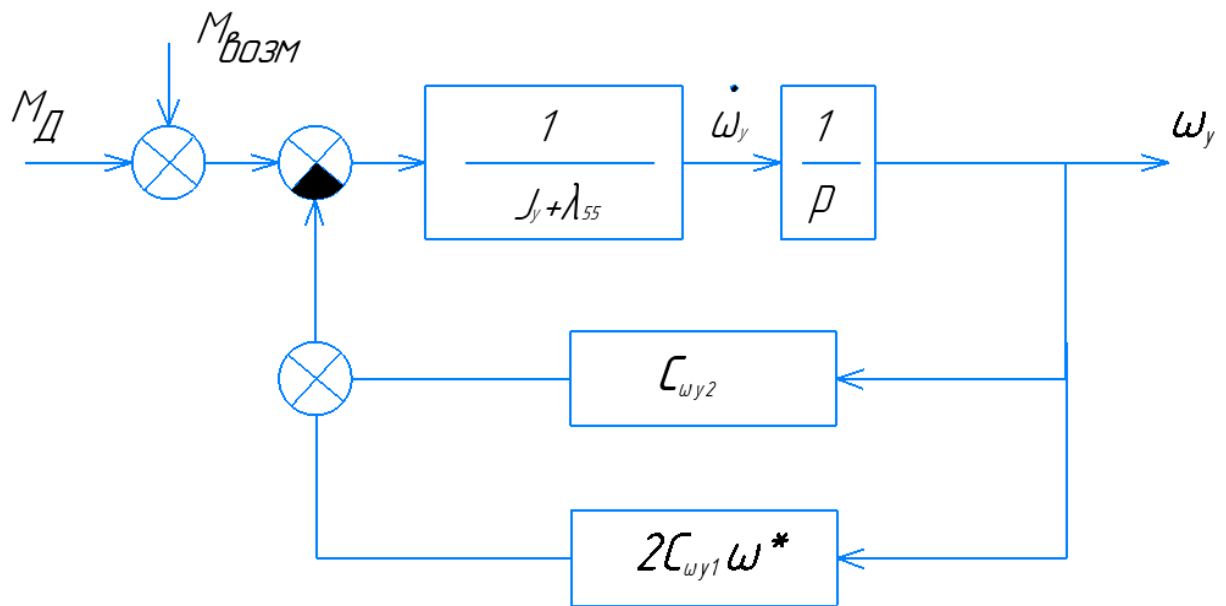


Рисунок 12 – Линеаризованная структурная схема курса

Получим передаточную функцию канала курса по скорости:

$$W_{ПА}^{\omega_y} = \frac{\omega_y(p)}{M_{ДРК_y}(p)} = \frac{\frac{1}{(J_{yy} + \lambda_{55})p}}{1 + \frac{2C_{\omega y1}\omega_y^* + C_{\omega y2}}{(J_{yy} + \lambda_{55})p}} = \frac{K_{\omega_y}}{T_{\omega_y}p + 1},$$

где

$$K_{\omega_y} = \frac{1}{2C_{\omega y1}\omega_y^* + C_{\omega y2}} = 0,044 \frac{\text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м}^2} - \text{коэффициент усиления ПФ} \quad (13)$$

курсовой скорости;

$$T_{\omega_y} = \frac{(J_{yy} + \lambda_{55})}{2C_{\omega y1}\omega_y^* + C_{\omega y2}} = 21,45 \text{ с} - \text{постоянная времени ПФ курсовой} \quad (14)$$

скорости;

$W_{ПА}^{\omega_y}$  – передаточная функция АНПА канала скорости при повороте по курсу.

Тогда сама ПФ канала курса:

$$W_{\psi} = \frac{\psi(p)}{M_{дв}(p)} = W_{\omega y} \cdot \frac{1}{p} = \frac{\frac{1}{2C_{\omega y1}\omega_y^* + C_{\omega y2}}}{\frac{(J_{yy} + \lambda_{55})}{2C_{\omega y1}\omega_y^* + C_{\omega y2}} p + 1} \cdot \frac{1}{p} = \frac{K_{\psi}}{T_{\psi1}p + 1}.$$

### 3.4 Выводы по разделу 3

В данном разделе были проделаны следующие работы:

- составлены передаточные функции движительно-рулевого комплекса АНПА при движении по маршруту 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 13.

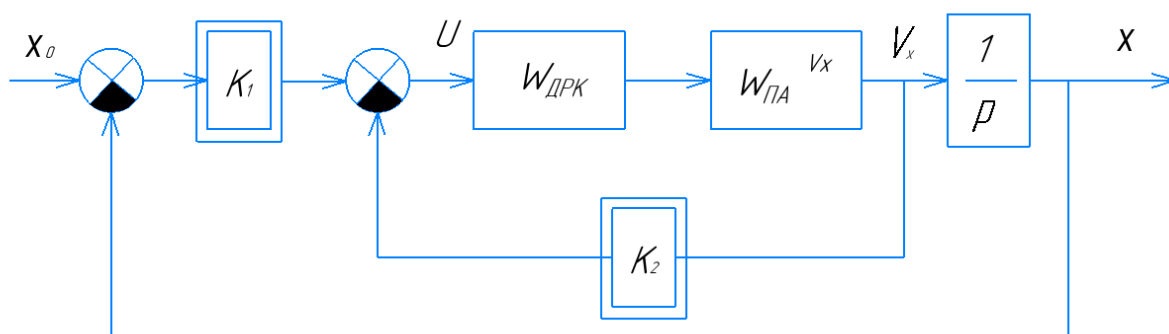


Рисунок 13 – Структурная схема модели АНПА при движении по маршруту с обратными связями

На схеме присутствуют размерные коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , которые и необходимо синтезировать.

## 4.1 Регуляторы контура марша

Для нахождения коэффициента  $K_2$  в ветви обратной связи по скорости воспользуемся методом стандартных характеристических полиномов [6, 7, 8]. Для этого в соответствии с рисунком 13 составим передаточную функцию по скорости для контура управления маршем.

$$\begin{aligned}
 W_c(p) &= \frac{V_x(p)}{V_{x0}(p)} = \frac{W_{ДРКx} W_{ПА}^{V_x}}{1 + W_{ДРКx} W_{ПА}^{V_x} K_2} = \frac{\frac{K_{ДРКx}}{T_{ДРК} p + 1} \cdot \frac{K_{vx}}{T_{vx} p + 1}}{1 + \frac{K_{ДРКx}}{T_{ДРК} p + 1} \cdot \frac{K_{vx}}{T_{vx} p + 1} K_2} = \\
 &= \frac{K_{ДРКx} K_{vx}}{(T_{ДРКx} p + 1)(T_{vx} p + 1) + K_{ДРКx} K_{vx} K_2} = \\
 &= \frac{K_{ДРКx} K_{vx}}{T_{ДРКx} T_{vx} p^2 + (T_{ДРКx} + T_{vx}) p + 1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2} = \frac{K_v}{T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1}.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 W_c(p) &= \frac{K_{ДРКx}}{T_{ДРКx} (m + \lambda_{11}) p^2 + (2T_{ДРКx} C_{vx1} V_x^* + T_{ДРКx} C_{vx2} + m + \lambda_{11}) p + K_{ДРКx} K_2 + 2C_{vx1} V_x^* + C_{vx2}} = \\
 &= \frac{K_v}{T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1}, \text{ где}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 K_v &= \frac{K_{ДРКx} K_{vx}}{1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2} = \frac{K_{ДРКx}}{K_{ДРКx} K_2 + 2C_{vx1} V_x^* + C_{vx2}} \frac{M}{B \cdot c}, \\
 T_v &= \sqrt{\frac{T_{ДРКx} T_{vx}}{1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2}} = \sqrt{\frac{T_{ДРКx} (m + \lambda_{11})}{K_{ДРКx} K_2 + 2C_{vx1} V_x^* + C_{vx2}}}, c.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Выразим коэффициент демпфирования  $\xi$  через постоянную времени передаточной функции по скорости:

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ДРКx} + T_{vx}}{1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2} \cdot \frac{1}{T_v} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ДРКx} + T_{vx}}{(1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2) \frac{\sqrt{T_{ДРКx} T_{vx}}}{\sqrt{1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2}}} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ДРКx} + T_{vx}}{\sqrt{T_{ДРКx} T_{vx}} (1 + K_{ДРКx} K_{vx} K_2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ДРКx} + T_{vx}}{T_{ДРКx} T_{vx}} \cdot T_v.$$

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

$$\xi = \frac{2T_{ДРК} C_{vx1} V_x^* + T_{ДРК} C_{vx2} + m + \lambda_{11}}{2T_{ДРК} (m + \lambda_{11})} T_v.$$

Из выражения (16) для  $T_v$  выразим коэффициент  $K_2$ :

$$K_2 = \frac{T_{ДРКx} (m + \lambda_{11}) - (2C_{vx1} V_x^* + C_{vx2}) \cdot T_v^2}{T_v^2 K_{ДРКx}}, \text{ а из формулы (17) извлечём}$$

постоянную времени  $T_v$  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  $T_v$  [6, 7].

$$T_v = \frac{2T_{ДРКx} T_{vx} \cdot \xi}{T_{ДРКx} + T_{vx}} = \frac{2T_{ДРК} (m + \lambda_{11}) \xi}{2T_{ДРКx} C_{vx1} V_x^* + T_{ДРКx} C_{vx2} + m + \lambda_{11}} = 0,411 \text{ с.} \quad (18)$$

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 3 получим

$$K_2 = 5,32 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{М}}.$$

Проверим устойчивость внутреннего контура скорости с нелинейностью движителей типа "насыщение" и без неё. Структурная схема представлена на рисунке 14. Наихудшим с точки зрения устойчивости является случай

нахождения АНПА «на стопе», поэтому на вход системы подадим малый сигнал, равный 0,02 м/с.

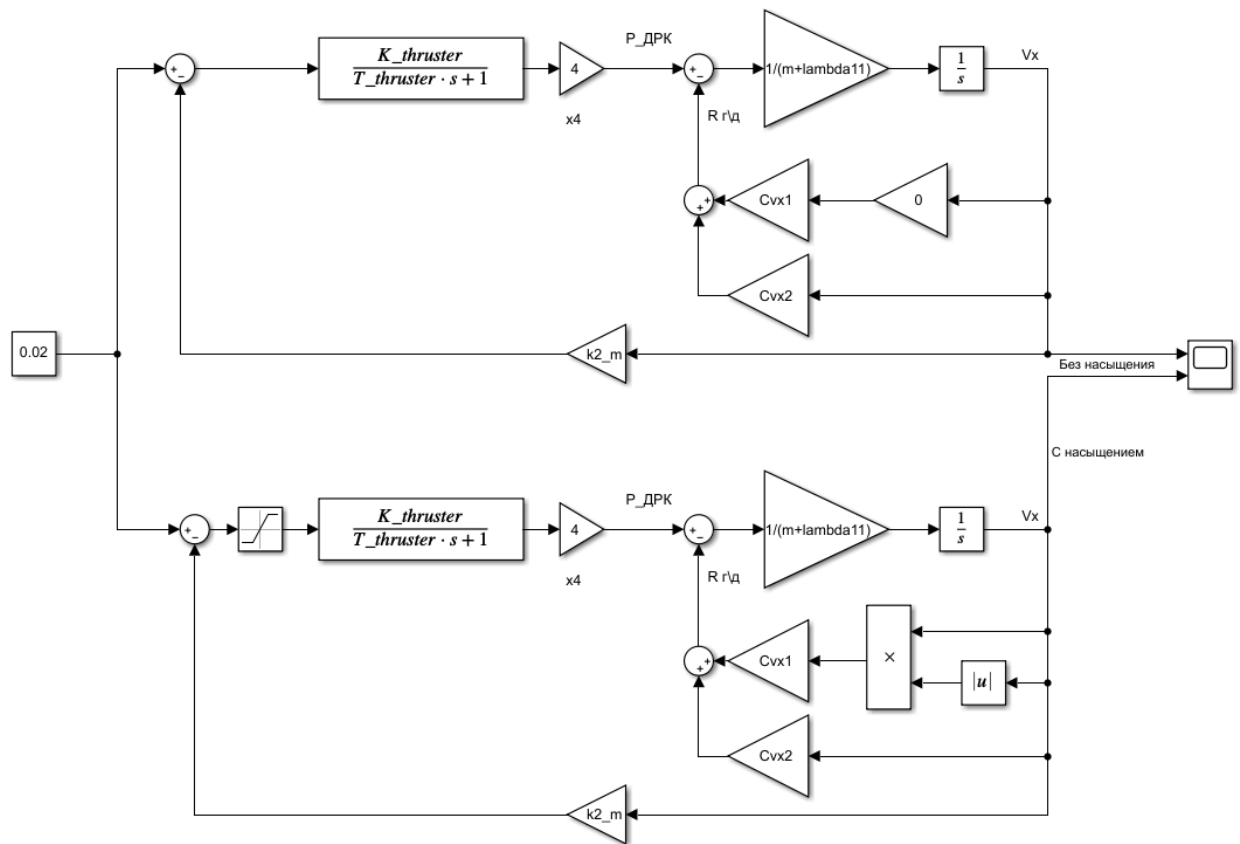


Рисунок 14 – Структурная схема контура скорости канала марша с нелинейностью и без неё

Результаты моделирования представлены на рисунке 15. Процесс сходящийся, внутренний контур скорости в канале марша устойчив. При малых входных сигналах нелинейность не оказывает влияния.

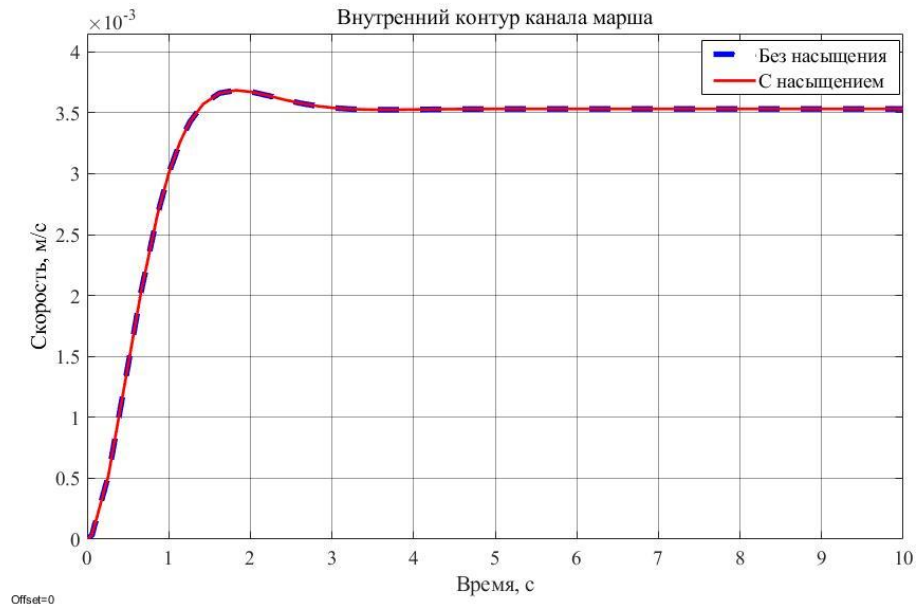


Рисунок 15 – Переходные процессы во внутреннем контуре скорости при задающем воздействии 0,02 м/с

Для определения регулятора  $K_1$ , находящегося в прямой ветви, воспользуемся частотным методом синтеза [7]. Для этого составим передаточную функцию разомкнутого контура положения.

$$W_{\text{разомкн}}(p) = \frac{K_1 K_v}{p(T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1)} = \frac{K_v}{p(T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1)}, \text{ где} \quad (19)$$

$K_v = K_1 \cdot K_v$  - показатель добротности системы,  $\text{с}^{-1}$ .

$$K_v = \frac{K_{\text{ДРКх}}}{K_{\text{ДРКх}} K_2 + 2C_{\text{vx1}} V_x^* + C_{\text{vx2}}} = \quad (20)$$

$$= \frac{98}{98 \cdot 5,32 + 0 + 33} = 0,177 \frac{\text{м}}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

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

$\omega_0 t$  – произведения базовой частоты и времени;

$M$  – 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, с. 381] примем показатель колебательности  $M$  равным 1,03. По формуле из [7, с. 373] определим наибольшее значение коэффициента  $K_1$ .

Подставим (20) в полученное выражение:

Промоделируем скорректированный контур марша, структурная схема которого в пакете Matlab Simulink показана на рисунке 16.

Рисунок 16 – Контур марша АНПА с синтезированными коэффициентами



На рисунке 17 показаны переходные процессы при входном ступенчатом воздействии. Полученная система устойчива.

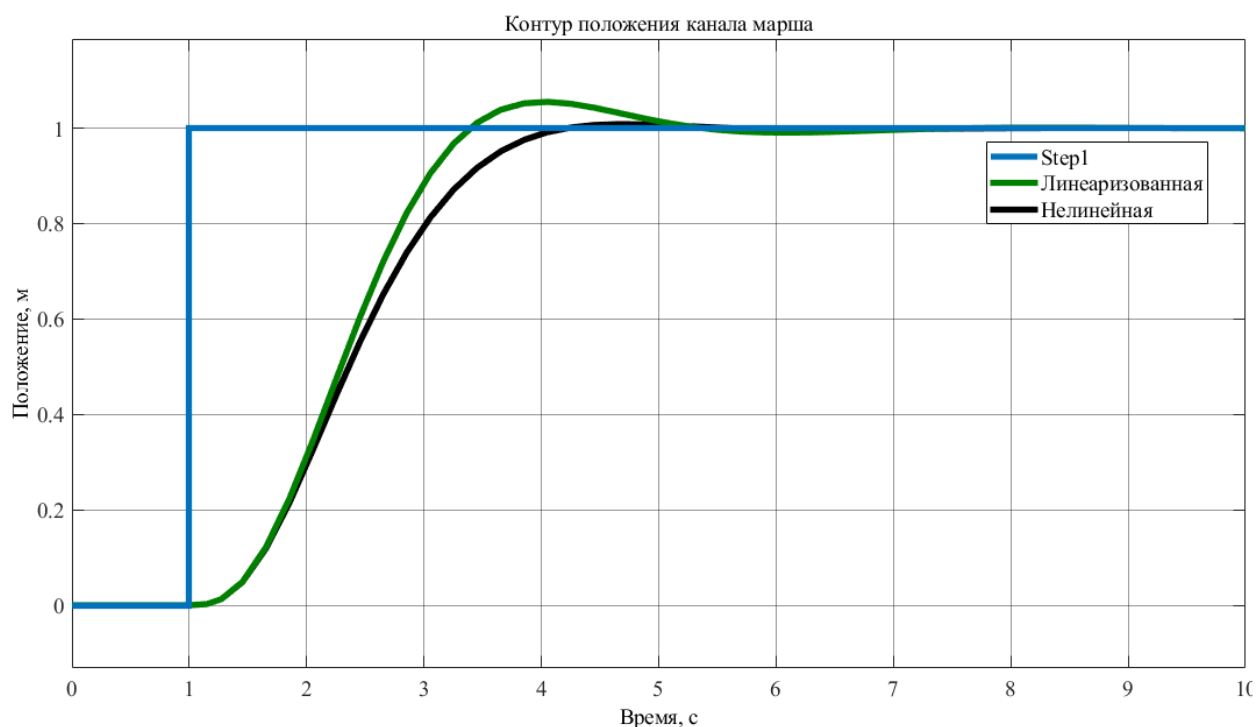


Рисунок 17 – Переходные процессы синтезированного контура положения канала марша при малом задающем воздействии 1 м

Параметры качества переходного процесса приведены в таблице 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, %	1,4
Время переходного процесса, с	5,47

## 4.2 Регуляторы контура курса

Аналогично контуру марша, проведём синтез регуляторов  $K_1$  и  $K_2$  контура курса, структурная схема которого показана на рисунке 18.

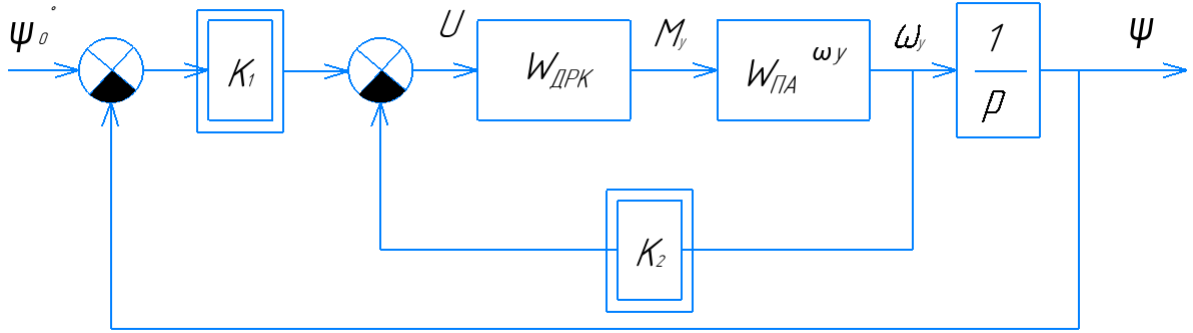


Рисунок 18 – Структурная схема контура курса

Передаточная функция по скорости для контура управления курсом:

$$W_c(p) = \frac{\omega_y(p)}{\omega_{y0}(p)} = \frac{W_{ДРК} W_{ПА}}{1 + W_{ДРК} W_{ПА} K_c K_2} = \frac{\frac{K_{ДРК\psi}}{T_{ДРК}p + 1} \cdot \frac{K_{\omega y}}{T_{\omega y}p + 1}}{1 + \frac{K_{ДРК\psi}}{T_{ДРК}p + 1} \cdot \frac{K_{\omega y}}{T_{\omega y}p + 1} K_c K_2} =$$

$$= \frac{K_{ДРК\psi} K_{\omega y}}{(T_{ДРК}p + 1)(T_{\omega y}p + 1) + K_{ДРК\psi} K_{\omega y} K_c K_2}.$$

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

$$W_c(p) = \frac{K_{ДРК\psi}}{T_{ДРК} J_{\Sigma} p^2 + (T_{ДРК} (2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2}) + J_{\Sigma}) p + (K_{ДРК\psi} K_c K_2 + 2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2})} =$$

$$= \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}^2 p^2 + 2\xi T_{\omega} p + 1}, \text{ где}$$

$$K_{\omega} = \frac{K_{\text{ДРК}\psi}}{K_{\text{ДРК}\psi} K_c K_2 + 2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2}} \frac{с}{\text{кг} \cdot \text{м}^2},$$

$$T_{\omega} = \sqrt{\frac{T_{\text{ДРК}} J_{\Sigma}}{K_{\text{ДРК}\psi} K_c K_2 + 2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2}}} с,$$

$$J_{\Sigma} = J_{yy} + \lambda_{55} = 483 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 - \text{суммарный момент инерции АНПА.}$$

Выразим коэффициент демпфирования  $\xi$  через постоянную времени передаточной функции по скорости:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{2T_{\text{ДРК}} C_{\omega y1} \omega_y^* + T_{\text{ДРК}} C_{\omega y2} + J_{\Sigma}}{\sqrt{T_{\text{ДРК}} J_{\Sigma} (2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2} + K_{\text{ДРК}\psi} K_c K_2)}} = \frac{2T_{\text{ДРК}} C_{\omega y1} \omega_y^* + T_{\text{ДРК}} C_{\omega y2} + J_{\Sigma}}{2T_{\text{ДРК}} J_{\Sigma}} T_{\omega}.$$

Из выражения для  $T_{\omega}$  выразим коэффициент  $K_2$ :

$$K_2 = \frac{T_{\text{ДРК}} J_{\Sigma} - (2C_{\omega y1} \omega_y^* + C_{\omega y2}) T_{\omega}^2}{T_{\omega}^2 K_c K_{\text{ДРК}\psi}} \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{градус}},$$

$$T_{\omega} = \frac{2T_{\text{ДРК}} J_{\Sigma} \xi}{2T_{\text{ДРК}} C_{\omega y1} \omega_y^* + T_{\text{ДРК}} C_{\omega y2} + J_{\Sigma}} = 0,418 \text{ с.}$$

После подстановки всех известных параметров получим  $K_2 = 0,637 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{градус}}.$

На рисунке 19 представлена структурная схема передаточной функции контура скорости канала курса в пакете Matlab Simulink с учётом нелинейности двигателей и без неё.

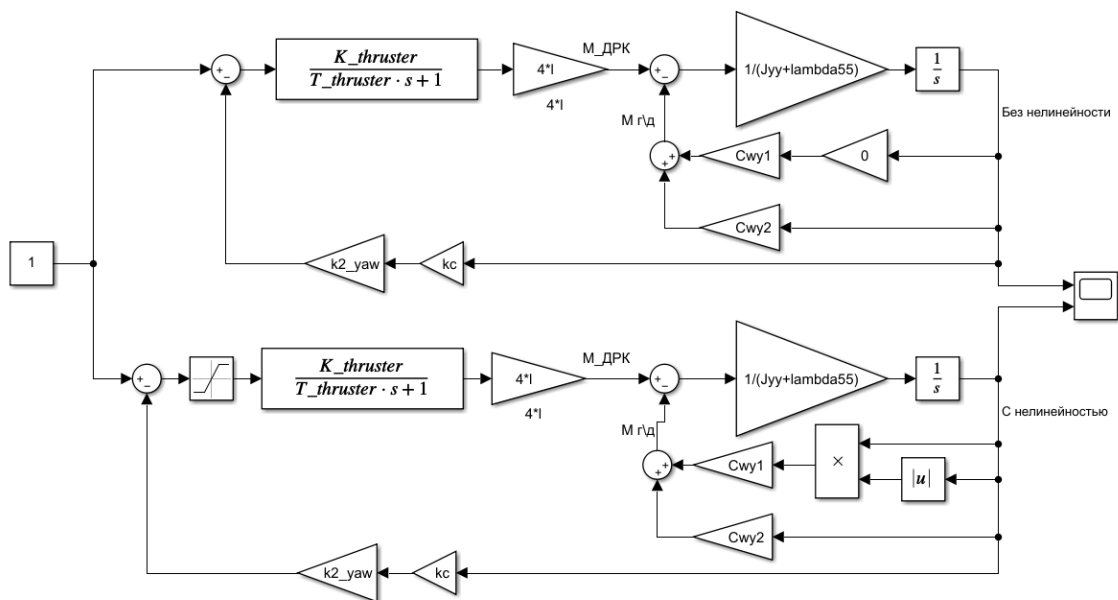


Рисунок 19 – Структурная схема внутреннего контура скорости канала курса

При малом задающем воздействии график переходного процесса, показанный на рисунке 20, сходится к постоянному значению, что свидетельствует об устойчивости внутреннего контура скорости.

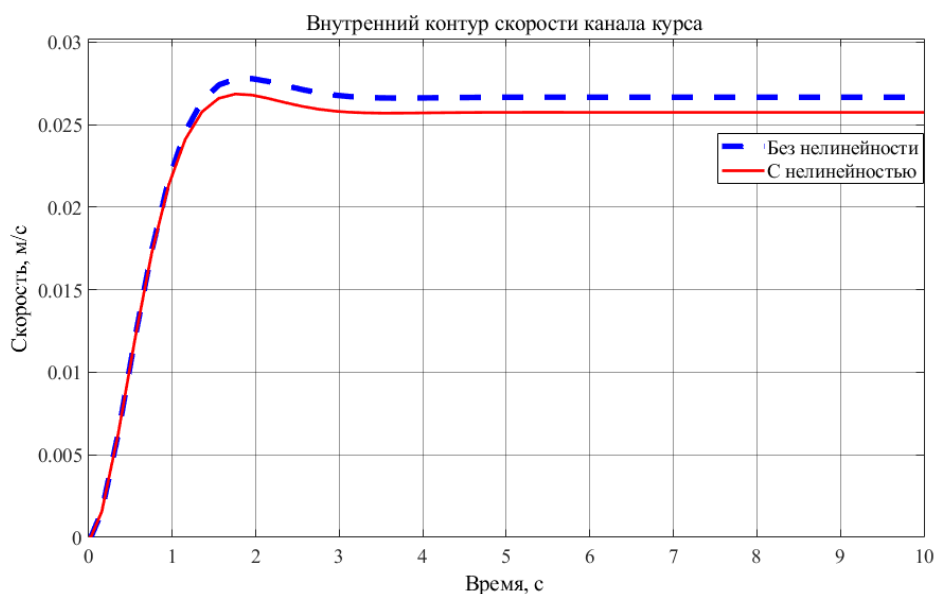


Рисунок 20 – Переходной процесс внутреннего контура скорости канала марша с учётом нелинейности и без неё при входном воздействии 1 %/с

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 18.

$$K_{\omega} = \frac{K_{ДРК\psi}}{K_{ДРК\psi} K_c K_2 + 2C_{\omega 1} \omega_y^* + C_{\omega 2}} =$$

$$= \frac{1,35}{1,35 \cdot 57,3 \cdot 0,0569 + 0,0527} = 0,30278 \frac{\text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м}^2},$$

$$T_{\omega} = \sqrt{\frac{T_{ДРК} J_{\Sigma}}{K_{ДРК\psi} K_c K_2 + 2C_{\omega 1} \omega_y^* + C_{\omega 2}}} = 0,14049, \text{ с.}$$

Примем показатель колебательности  $M$  равным 1,03.

$$K_{\Omega} \cdot \sum T_i \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2}.$$

$$K_1 \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{4T_{\omega} K_{\omega} K_c} = \frac{1,03^2 + 1,03\sqrt{1,03^2 - 1}}{4 \cdot 0,14049 \cdot 0,30278 \cdot 57,3} = 0,515 \frac{\text{В}}{\text{градус}}. \quad (21)$$

Структурная схема САУ АНПА по курсу показана на рисунке 21.

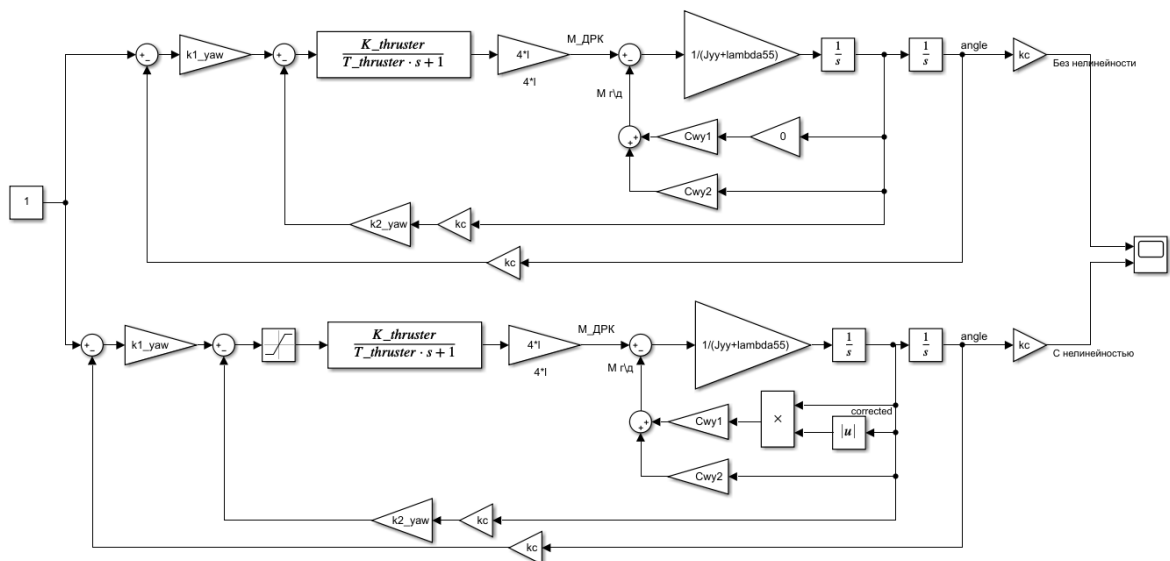


Рисунок 21– Структурные схемы нелинейного и линеаризованного контуров курса

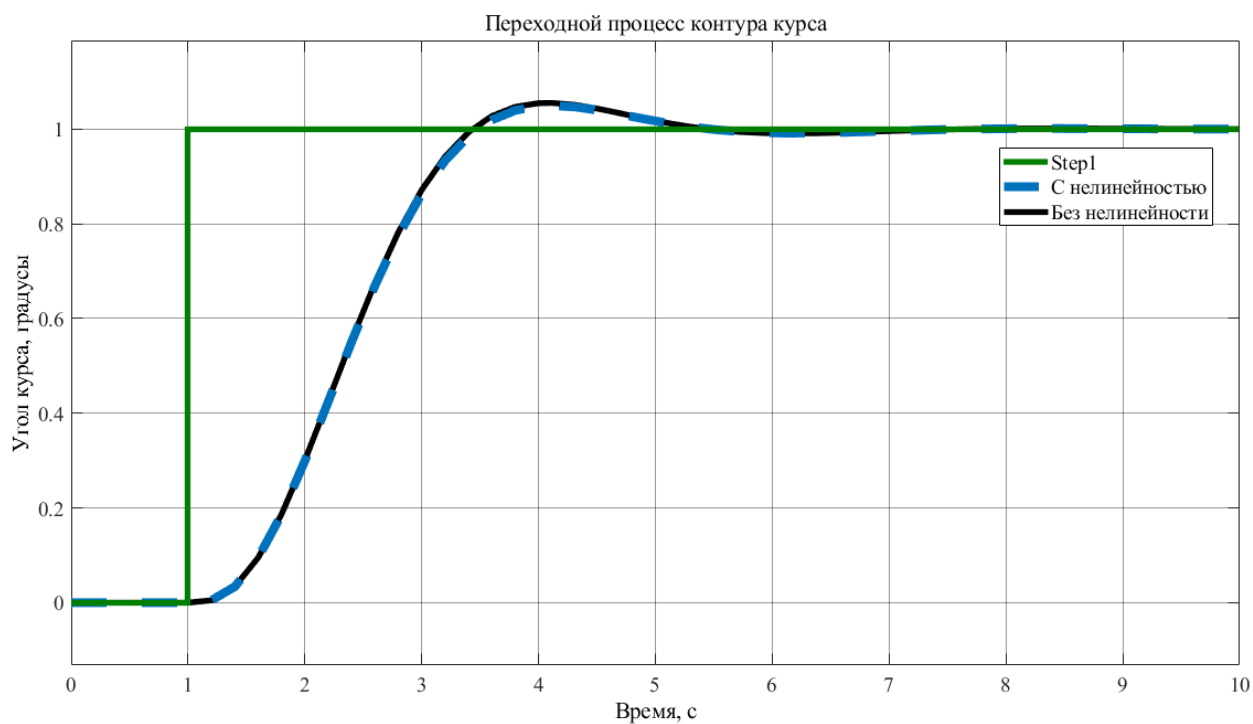


Рисунок 22 – Переходные процессы контура положения канала курса при малом задающем воздействии  $1^\circ$

Значения перерегулирования и времени переходного процесса представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения перерегулирования 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 – Синтезированные регуляторы

Канал марша	
Коэффициент усиления в обратной связи контура скорости K2	
Коэффициент усиления в прямой ветви контура положения K1	
Канал курса	
Коэффициент усиления в обратной связи контура скорости K2	
Коэффициент усиления в прямой ветви контура положения K1	





## 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.