Содержание

Список обозначений и сокращений ... 3
1 Техническое задание ... 4
2 Определение параметров математической модели ... 6
2.1 Выбор движитея ... 6
2.2 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при движении по маршу ... 9
2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу ... 11
2.4 Определение присоединённых масс ... 11
2.5 Определение моментов инерции аппарата ... 13
3 Математическая модель движения АНПА «МТ-2010» ... 14
3.1 Передаточные функции движительно-рулевого комплекса ... 16
3.1 Передаточная функция АНПА при движении по маршу ... 17
3.2 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу ... 19
4 Синтез регуляторов ... 22
4.1 Регуляторы контура курса ... 23
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ... 27

Список обозначений и сокращений

АКБ – аккумуляторная батарея;

ПА – подводный аппарат;

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;

ВМА – винтомоторный агрегат;

ДРК – движительно-рулевой комплекс;

СКУ – система контроля и управления.

1 Техническое задание

В данном курсовом проекте будет рассмотрено построение системы управления (СУ) движением автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) МТ-2010 по маршу 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	Ø0,45 × 3,0
Скорость, м/с	0-2,5
Автономность, ч (пробег ~ 100 км);	20
Энергетика: емкость батареи литий-ионных аккумуляторов, кВт·ч	2,6

1. Составить математическую модель движения АНПА по маршу и курсу;

2. Определить все недостающие параметры для синтеза СУ

3. Промоделировать полученные контуры управления;

4. Ввести корректирующие устройства.

2 Определение параметров математической модели

2.1 Выбор движителя

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

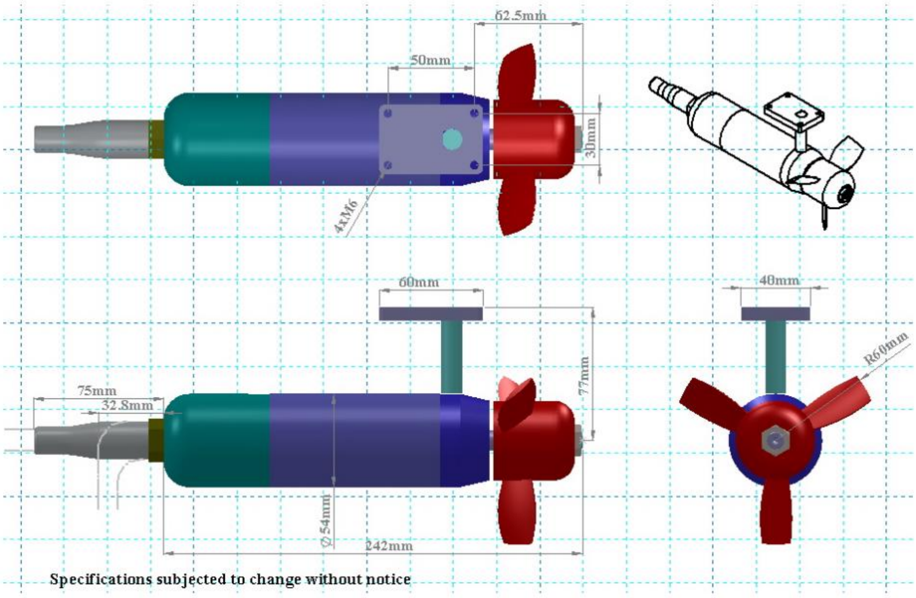


Рисунок 2 – Внешний вид винтомоторного агрегата 049-E 120-100

Параметры выбранного движителя представлены в таблице 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:

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

U – напряжение, подаваемое на движитель, В;

i – ток движителя, А,

R – сопротивление обмоток движителя, Ом,

L – индуктивность обмоток движителя, Гн,

Ke – коэффициент противоЭДС, В,

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

Уравнения момента могут быть представлены как:

$$M_{дв} = iK_{м},$$

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

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

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

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

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

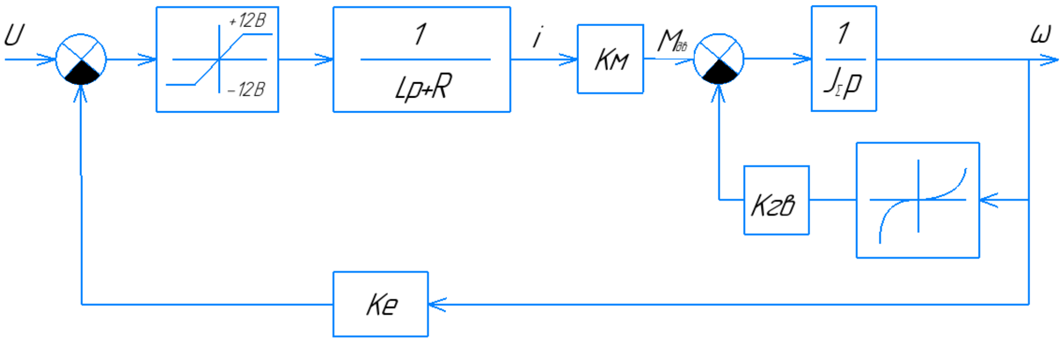


Рисунок 3 – Нелинейная структурная схема движителя

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

Итоговое уравнение динамики движителя:

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

а передаточная функция примет вид:

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

где

U – напряжение, В,

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

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

$K_{дв} = \frac{588}{24} = 24,5$ – 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.

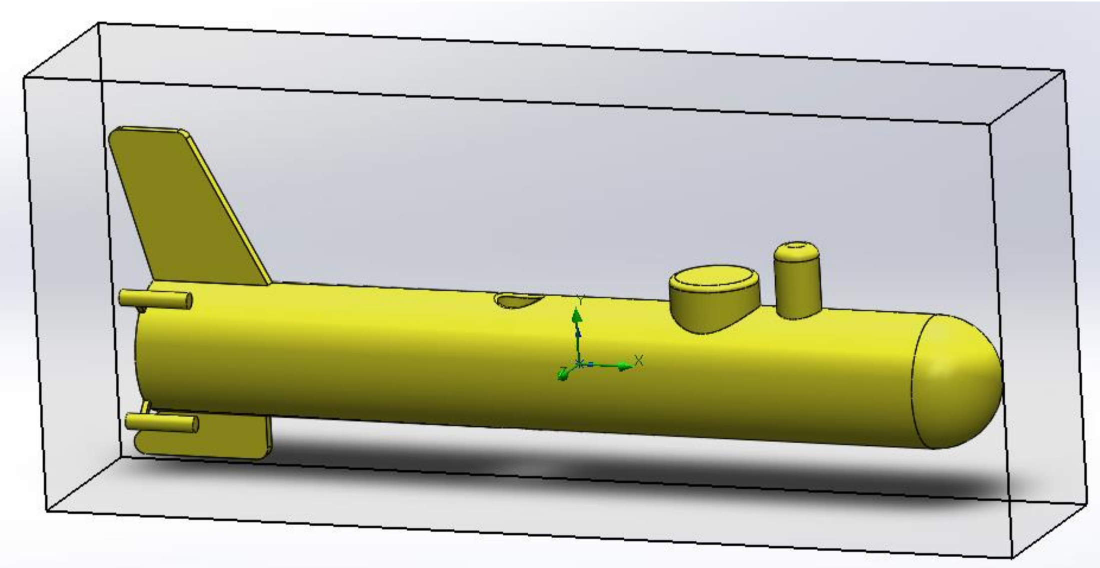
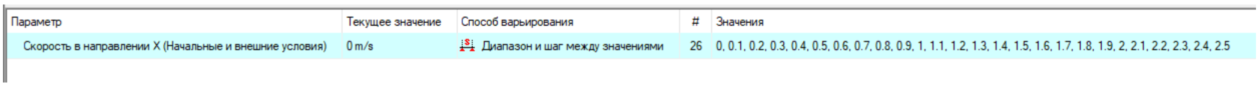


Рисунок 4 – Расчётная область

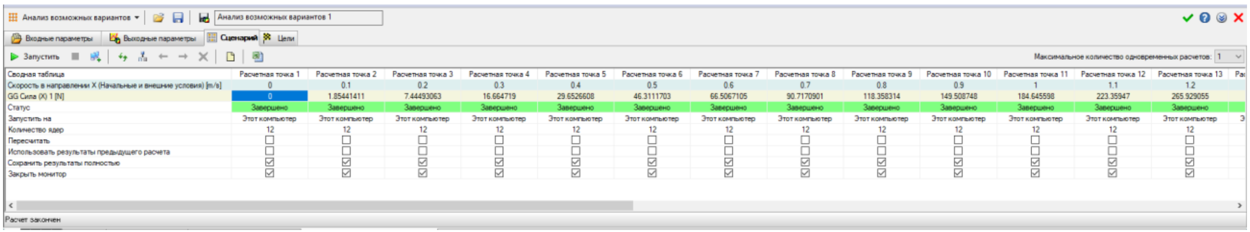
В созданном проекте в разделе «Новое параметрическое исследование» в качестве параметра указываем значения скорости вдоль базовой оси X в виде таблицы как на рисунке 5.



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.



Сводная таблица	Расчетная точка 1	Расчетная точка 2	Расчетная точка 3	Расчетная точка 4	Расчетная точка 5	Расчетная точка 6	Расчетная точка 7	Расчетная точка 8	Расчетная точка 9	Расчетная точка 10	Расчетная точка 11	Расчетная точка 12	Расчетная точка 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 (X) 1 [N]	0	1.85441411	7.44493063	16.664719	29.6526608	46.3111703	66.5067105	90.7170901	118.358314	149.508748	184.645598	223.35947	265.929055
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 ядер	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Пересчитать	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Использовать результаты предыдущего расчета	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Сохранить результаты полностью	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Закрыть монитор	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑

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_x (рисунок 7).

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

Таким образом, выявленная зависимость имеет вид:

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

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

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

2.3 Расчёт гидродинамической силы сопротивления при повороте по курсу

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

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

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

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

2.4 Определение присоединённых масс

Для составления математической модели АНПА при движении по маршу определим коэффициент присоединённых масс λ_{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.

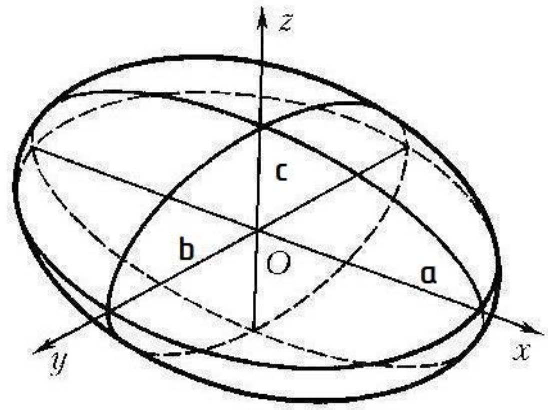


Рисунок 8 – Расположение полуосей эллипсоида

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

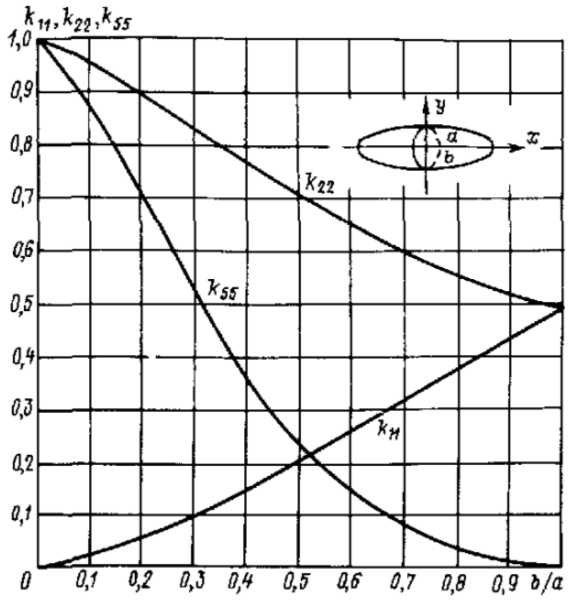


Рисунок 9 – Графики коэффициентов присоединённых масс

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

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

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

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:

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

d – диаметр АНПА,

L – длина по габаритам.

Определим среднюю плотность аппарата: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{300 \text{ кг}}{0{,}47 \text{ м}^3} = 638 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, 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 $J_{yy} = 366 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

3 Математическая модель 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]:

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

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; $\vec{R},\overrightarrow{M}$ - 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 Oxy является плоскостью симметрии аппарата, и присоединённые массы $\lambda_{13},\lambda_{14},\lambda_{15},\lambda_{23}$, $\lambda_{24},\lambda_{25},\lambda_{36},\lambda_{46}$ и λ_{56} равны нулю, принимают вид:

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

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

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

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

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

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

где λ_{ij}, $i=1,...,6$, $j=1,...,6$ - 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 OX и назначим плечо равным диаметру аппарата: $l = D/2 = 0,225$ м. Тогда передаточная функция ДРК АНПА при движении по маршу в соответствии с (1) примет вид:

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

где

$P_{ДРКx}$ – тяга ДРК, Н,

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

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

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

Передаточная функция ДРК АНПА при повороте по курсу:

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

где

$\mathrm{M}_{\text{ДРКу}}$ - суммарный момент ДРК, Н·м;

$\mathrm{K}_{\text{ДРК}\psi} = 4 \cdot 0,255 \cdot 24,5 = 22,05$ – коэффициент усиления движительно-рулевого комплекса канала курса, Н·м/В.

3.1 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 ($\omega_x = \omega_z = 0$);
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:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \dfrac{dV_x}{dt} = P_{ДРКx} - R_x + F_{возм}, \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \dfrac{d\omega_y}{dt} = M_{ДРКy} - M_y + M_{возм}, \end{cases} \tag{6}$$

где $P_{ДРКx}$ – суммарная тяга ДРК АНПА, R_x – сила гидродинамического сопротивления, $\mathrm{F}_{\text{возм}}$ – возмущающая сила, $\mathrm{M}_{\text{ДРКу}}$ – суммарный момент ДРК, $\mathrm{M}_{\text{у}}$ – гидродинамический момент сопротивления, действующий на аппарат,

$M_{возм}$ – возмущающий момент. $F_{возм}$ и $M_{возм}$ 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)**Ошибка! Источник ссылки не найден.** для гидродинамической силы:

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

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

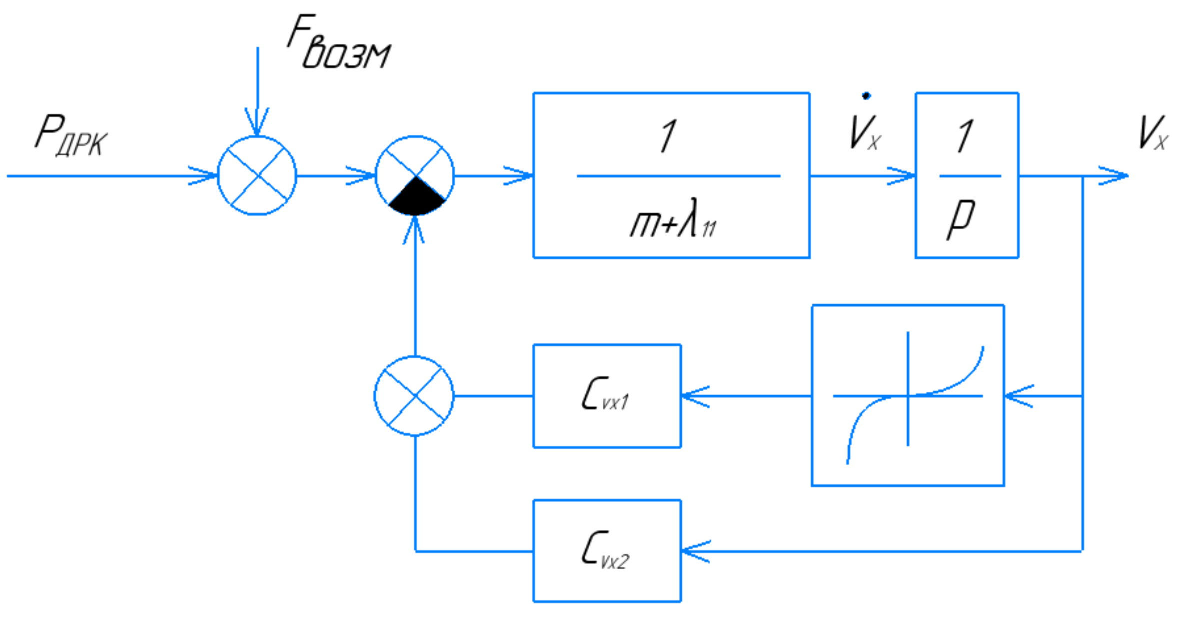


Рисунок 10 – Структурная схема управления маршевой скоростью АНПА с нелинейностью от сил гидродинамического сопротивления

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

$$R_x = \frac{d}{dV_x}\Big[\; C_{vx1}\cdot V_x^{\;2} + C_{vx2}\cdot V_x \;\Big]_{V_x = V_x * = 0,7} V_x = \\ = (2C_{vx1}\cdot V_x * + C_{vx2})V_x = 106,16\cdot V_x. \tag{8}$$

Получим передаточную функцию канала маршевой скорости.

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

где

$$K_{vx} = \frac{1}{2C_{vx1}V_x * + C_{vx2}} = 0,03 \quad //0,0094\,\frac{\text{с}}{\text{кг}} \tag{10}$$ – коэффициент усиления канала марша,

$$T_{vx} = \frac{m+\lambda_{11}}{2C_{vx1}V_x * + C_{vx2}} = 9,48 \;\; //2,95\,\text{с} \tag{11}$$ – постоянная времени канала марша.

3.2 Передаточная функция АНПА при повороте по курсу

Уравнение, описывающие движение АНПА по курсу, составленное на основе **Ошибка! Источник ссылки не найден.**:

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

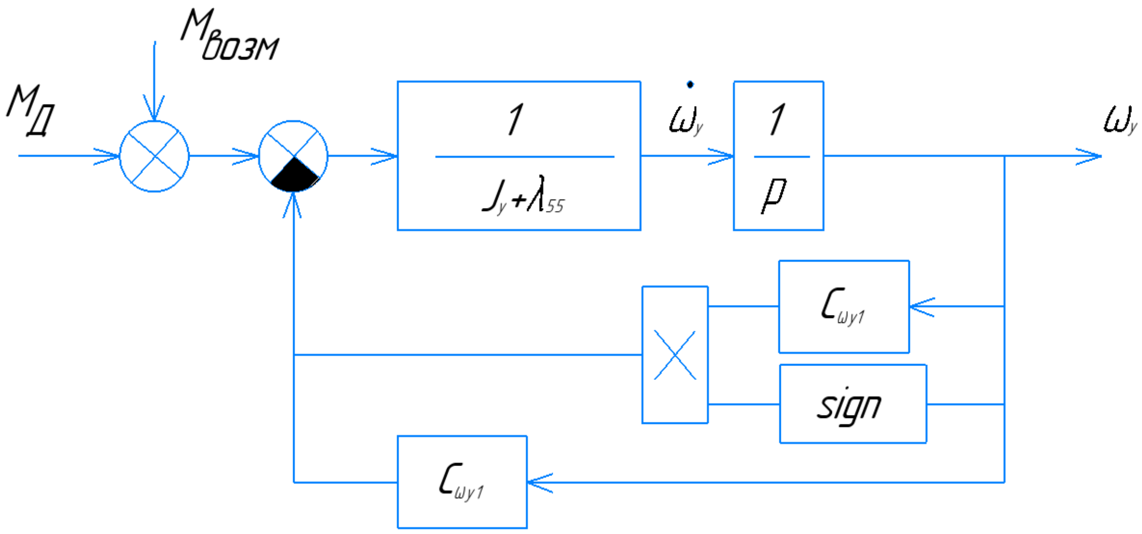


Рисунок 11 – Нелинейная структурная схема канала курса

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:

$$M_y = C_{\omega y1}\omega_y \cdot |\omega_y| + C_{\omega y2}\omega_y = (2C_{\omega y1}\omega_y * + C_{\omega y2}) \cdot \omega_y$$ и

$$(J_{yy} + \lambda_{55})\frac{d\omega_y}{dt} = M_{ДРКy} - (2C_{\omega y1}\omega_y * + C_{\omega y2}) \cdot \omega_y + M_{возм}.$$

Структурная схема показана на рисунке 12.

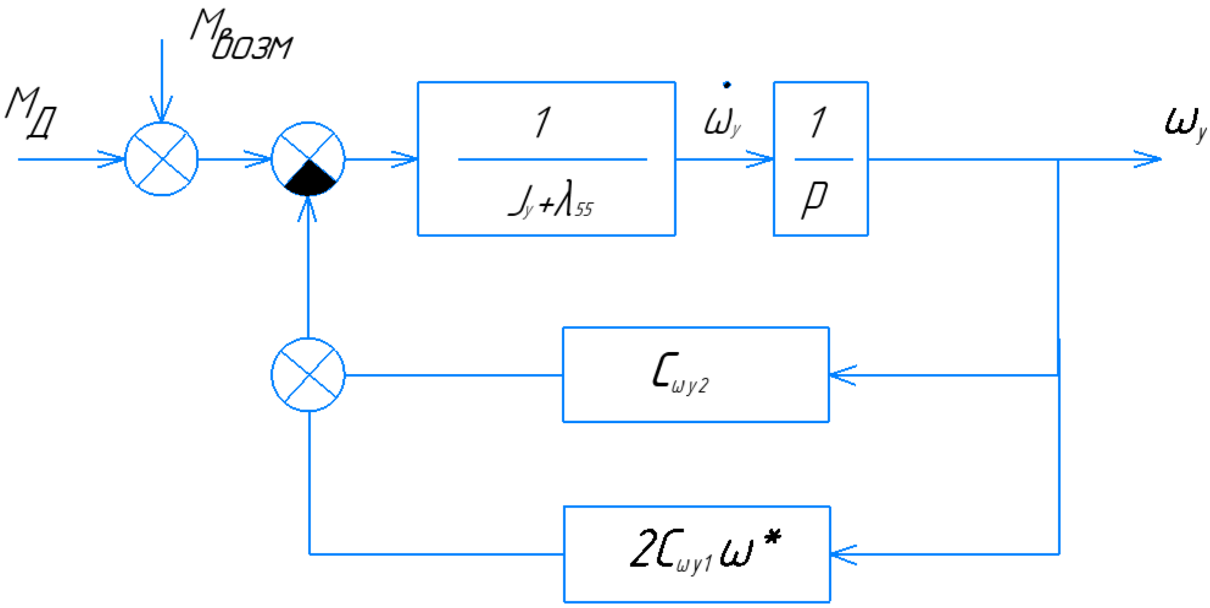


Рисунок 12 – Линеаризованная структурная схема курса

Получим передаточную функцию канала курса:

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

где

$$K_{\omega y} = \frac{1}{2C_{\omega y1}\omega*+C_{\omega y2}} = 0,044\ \frac{с}{кг\cdot м^2}$$ – коэффициент усиления ПФ курсовой скорости; (13)

$$T_{\omega y} = \frac{(J_{yy}+\lambda_{55})}{2C_{\omega y1}\omega*+C_{\omega y2}} = 21,45\ с$$ – постоянная времени ПФ курсовой скорости; (14)

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

Тогда сама ПФ канала курса:

$$W_{\psi} = \frac{\psi(p)}{M_{дв}(p)} = W_{\omega у} \cdot \frac{1}{p} = \frac{\dfrac{1}{2C_{\omega у1}\omega_{у}{*} + C_{\omega у2}}}{\dfrac{(J_{уу} + \lambda_{55})}{2C_{\omega у1}\omega_{у}{*} + C_{\omega у2}} p + 1} \cdot \frac{1}{p} = \frac{K_{\psi}}{T_{\psi 1} p + 1}.$$

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~~9~~.

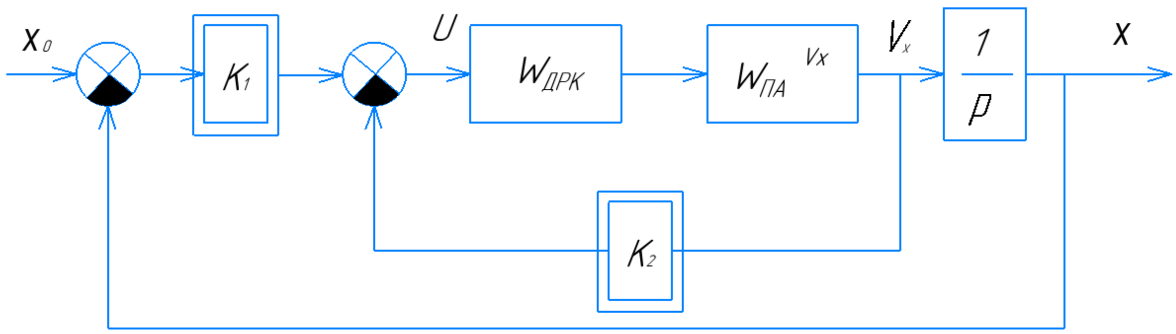


Рисунок 13 – Структурная схема модели АНПА при движении по маршу с обратными связями

На схеме присутствуют размерные коэффициенты К$_1$ и К$_2$, которые и необходимо синтезировать.

4.1 Регуляторы контура курса

Для нахождения коэффициента К$_2$ 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.

$$Wc(p) = \frac{Vx(p)}{Vx_0(p)} = \frac{W_{ДРКx} W_{ПА}{}^{Vx}}{1 + W_{ДРКx} W_{ПА}{}^{Vx} K_2} = \frac{\dfrac{K_{ДРКx}}{T_{ДРК}\,p+1} \cdot \dfrac{K_{vx}}{T_{vx}\,p+1}}{1 + \dfrac{K_{ДРКx}}{T_{ДРК}\,p+1} \cdot \dfrac{K_{vx}}{T_{vx}\,p+1} K_2} =$$

$$= \frac{K_{ДРКx} K_{vx}}{(T_{ДРКx}\,p+1)(T_{vx}\,p+1) + K_{ДРКx} K_{vx} K_2}.$$

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

$$Wc(p)=\frac{K_{ДРКx}}{T_{ДРКx}(m+\lambda_{11})p^2+(2T_{ДРКx}C_{vx1}V_x*+T_{ДРКx}C_{vx2}+m+\lambda_{11})p+K_{ДРКx}K_2+2C_{vx1}V_x*+C_{vx2}}=$$

$$=\frac{K_v}{T_v{}^2p^2+2\xi T_v p+1}, \text{ где} \qquad (15)$$

$$K_v=\frac{K_{ДРКx}}{K_{ДРКx}K_2+2C_{vx1}V_x*+C_{vx2}} \quad \frac{м}{В\cdot с},$$

$$T_v=\sqrt{\frac{T_{ДРКx}(m+\lambda_{11})}{K_{ДРКx}K_2+2C_{vx1}V_x*+C_{vx2}}}, с. \qquad (16)$$

Выразим коэффициент демпфирования ξ через постоянную времени передаточной функции по скорости:

$$\xi=\frac{1}{2}\frac{2T_{ДРК}C_{vx1}V_x*+T_{ДРК}C_{vx2}+m+\lambda_{11}}{\sqrt{(2C_{vx}V_x*+K_{ДРКx}K_2)T_{ДРК}(m+\lambda_{11})}}= \qquad (17)$$

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

Из выражения (16) для T_v выразим коэффициент K_2:

$$K_2=\frac{T_{ДРКx}(m+\lambda_{11})-(2C_{vx1}V_x*+C_{vx2})\cdot T_v{}^2}{T_v{}^2K_{ДРКx}},$$ 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].

$$T_v=\frac{2T_{ДРК}(m+\lambda_{11})\xi}{2T_{ДРКx}C_{vx1}V_x*+T_{ДРКx}C_{vx2}+m+\lambda_{11}}=0,0426, с. \qquad (18)$$

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

$$K_2 = 527,58\,\frac{В \cdot с}{м}.$$

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

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

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

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

$$= \frac{98}{98 \cdot 527,58 + 2 \cdot 182,87 \cdot 0,2 + 33} = 0,0019\,\frac{м}{В \cdot с}.$$

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 М равным

1,03. По формуле из [7, с. 373] определим наибольшее значение коэффициента $К_1$.

$$K_V \cdot \sum T_i \le \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2}.$$

Подставим (26) и (28) в полученное выражение

$$K_1 \le \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{4T_v K_v} = \frac{1,03^2 + 1,03\sqrt{1,03^2 - 1}}{4 \cdot 0,04255 \cdot 0,0019} = 4066\,\frac{В}{м}.$$

По результатам моделирования итоговое значение коэффициента $К_1$ примем равным 4066 В/м.

На рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показана структурная схема, составленная в пакете математического моделирования Matlab Simulink [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

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.