

Ха Мань Тханг

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), на кафедре корабельных систем управления

**Научный руководитель:** Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Лукомский Юрий Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Душин Сергей Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры автоматике и процессов управления

**Дмитриев Борис Федорович**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко» Российской Академии Наук

Защита состоится « 20 » мая 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.212.238.07 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

**Ученый секретарь**

диссертационного совета

Д.212.238.07

кандидат технических наук

В.В.Цехановский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время одной из актуальных проблем теории управления является управление групповым движением объектов. Везде, где существует некоторая группа технических объектов, которые должны совместно решать некоторые задачи, возникает проблема координированного управления или координированного взаимодействия. Объекты могут быть разной природы, вследствие чего взаимодействие может происходить в различных условиях.

Очевидно, групповое движение объектов требует **разработки специального математического и алгоритмического обеспечения систем управления и обработки информации**. В основе разработки обеспечения лежит учет механизмов взаимодействия объектов, их выявление, математическое описание и включение в состав алгоритмов.

С другой стороны, групповое движение требует **разработки проблемно-ориентированных систем управления**, способных оперативно оценивать поведение объектов в группе, принимать решения и отработку команд управления. Такие системы управления, устанавливаемые на подвижных объектах, принято называть координированными.

Частным случаем задачи управления групповым движением объектов является **задача координированного управления морскими подвижными объектами (МПО)**. Практические задачи, которые необходимо решать с применением МПО, в настоящее время часто связаны с групповым движением. Технические средства, энергоресурсы, а также средства навигации современных судов позволяют осуществлять такие функции, как передача грузов с борта на борт, заправка на ходу, швартовка в открытом море к подвижному объекту и др. Системы управления движением судов должны иметь соответствующее алгоритмическое и техническое обеспечение, а синтез алгоритмов координированного управления требует специфического математического описания. Таким образом, задача исследования модели и алгоритма координированного управления морскими подвижными объектами является весьма **актуальной**.

**Объектом исследования** в диссертации являются система управления движением надводного водоизмещающего корабля (судно) и орган управления движения судна.

**Предметом исследования** в работе являются разработка математического и алгоритмического обеспечения процессов координированного управления движением морских подвижных объектов на примере маневрирования судов.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества координированного управления морскими подвижными объектами (МПО), путем разработки математического и алгоритмического обеспечения процесса управления. При этом координированное управление движением означает одновременную стабилизацию или независимое друг от друга одновременное изменение нескольких кинематических параметров движения, связанных между собой в силу управляемого объекта.

**Достижение цели работы обеспечено решением следующих задач:**

1. Разработка математической модели подвижных объектов, учитывающей их взаимодействие при движении (в качестве примера: модели двух судов с учетом гидродинамического взаимодействия).

2.Разработка алгоритмов управления подвижным объектом, учитывающих поведение другого подвижного объекта в группе (в качестве примера: алгоритм управления движения судна при сближении с другим судном).

3.Разработка алгоритма распределения ресурсов средств управления подвижного объекта при групповом движении нескольких объектов в ограниченной территории

**Методы исследования.** Основные теоретические и экспериментальные результаты работы получены в рамках применения методов синтеза алгоритмов управления линейными и нелинейными динамическими системами ; методов математических моделирования нелинейной динамических систем; методов математической статистики ; поисковых методов оптимизации; компьютерных методов исследования на базе стандартных программных продуктов ; теории оптимального управления; теории корабля; теории случайных величин. Проверка эффективности полученных теоретических результатов производится в процессе моделирования с помощью среды Matlab-Simulink.

**Достоверность научных и практических результатов.** Достоверность научных положений результатов и выводов диссертации подтверждается тем, что выдвинутые в работе положения и предложенные метод и модели находятся в русле развития современных информационных технологий, вычисляет из многочисленных литературных источников. Так же обуславливается корректным использованием указанных выше методов исследования, применением современных компьютерных средств и программных комплексов; а также результатами исследования движения судна под действием внешних возмущений в лабораторных работах.

**Научные результаты, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие результаты, вытекающие из поставленной цели и решения сформулированных задач:

1.Математические модели взаимного перемещения двух судов с учетом гидродинамического взаимодействия между ними.

2.Стабилизация движения судна при действии гидродинамического взаимодействия

3.Алгоритм управления движения судна при сближении с другим судном.

4.Компьютерные модели исполнительных органов управления, внешних возмущений и собственного движения судна.

5.Оптимальный алгоритм распределения управляющих сил и моментов в режиме динамического позиционирования и результаты моделирования.

#### **Научная новизна работы:**

1.Разработка модели движения двух судов с учетом гидродинамического взаимодействия между ними.

2.Разработка алгоритма управления движением судов при сближении с другим движущимся судном и алгоритма оптимального распределения управляющих сил и моментов между исполнительными органами судна в режиме динамического позиционирования .

3.Предложена общая форма для сил и моментов возможных сочетаний исполнительных органов управления любой конфигурации с помощью матрицы конфигураций и построен блок моделирования для любого комплекса органов управления, перспективнее использование при исследовании движения судна.

4.Разработаны два метода расчета сил и момента волнения с разными спектрами (в том числе; «двугорбый спектр»).

5. Разработаны компьютерные модели органов управления, внешних возмущений и собственного движения судов.

**Практическая ценность результатов работы:**

- разработаны программы, позволяющие проводить моделирование и анализ движения судов в узкостях с учетом гидродинамического взаимодействия между ними. Создана схема моделирования движения двух судов при помощи блока S-функций в среде MATLAB.

- разработаны программы реализации алгоритмов управления движением судна при сближении с другим движущимся судном.

- разработаны программы расчета сил и момента волны с разными спектрами, и разработаны блоки расчета сил и моментов гребного винта с разными моделями в пакете MATLAB.

- разработана методика проектирования комплекса органов управления с сложной конфигурацией.

- разработаны программы реализации алгоритма распределения управляющих сил и моментов в режиме динамического позиционирования .

**Внедрение результатов работы.** Теоретические положения, методики расчета и компьютерные модели использованы для создания библиотеки блоков имитаций движений судна в среде MATLAB-SIMULINK.

В учебном процессе результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре корабельных систем управления СПбГЭТУ при преподавании студентам пятого курса учебной дисциплины « Системы управления морскими подвижными объектами».

**Апробация работы.** Основные научные положения и результаты диссертации докладывались на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ 2010-2011 года, на конференциях «Навигация и управления движением» 2011-2012 годов.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в пять научных работах, в том числе три статей в изданиях, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК и две работы в материалах всероссийской научно-технической конференции.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Основной материал диссертации изложен на 125 страницах машинописного текста, включает 52 рисунков и содержит список литературы из 81 наименований, среди которых 59 отечественных и 22 иностранных источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена область исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, изложены основные результаты, выносимые на защиту, их теоретическая и практическая значимость, отражены сведения о структуре работы.

**В первой главе** выполнен анализ и обзор современных математических моделей движений судов и описана методика построения модели движения судна. В качестве примера рассматривается унифицированная математическая модель движения судов на горизонтальной плоскости. Предлагаются нелинейные уравнения движения судов с учетом гидродинамического взаимодействия между ними, которые представлены в виде:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_y = a_{11}\omega_y + a_{12}\beta + [1/J_y](M_{вз} + M_{упр}), \\ \dot{\beta} = a_{21}\omega_y + a_{22}\beta + a_0\beta|\beta| + [1/\rho v V_1](F_{вз} + F_{зупр}), \\ \dot{\phi} = \omega_y, \\ \dot{x}_g = V \cos(\beta - \phi), \\ \dot{z}_g = V \sin(\beta - \phi), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\phi$  – угол курса судна;  $\beta$  – угол дрейфа;  $\omega_y$  – угловая скорость рыскания;  $x_g, z_g$  – координаты центра масс судна в неподвижной системе координат;  $M_{упр}, F_{зупр}$  – суммарные силы и моменты средств управления по соответствующим осям.

Из выражения (1) видно что, для построения моделей судов с учетом гидродинамического взаимодействия необходимо рассчитать силы и моменты, возникающие при сближении с другим судном. Модельные эксперименты показали, что с уменьшением относительного расстояния между судами силы и момент резко возрастают по нелинейному закону. Наибольшие силы гидродинамического взаимодействия возникают, в момент, когда мидель одного судна находится на траверзе миделя другого судна. Наибольшие по абсолютной величине моменты гидродинамического взаимодействия возникают в том случае, когда мидель одного судна находится примерно на траверзе кормы другого судна. Сила и момент определяются как

$$F_{вз} = \frac{1}{2} \rho V_i^2 c_{F_{вз}} L_i^2 T_i, \quad (2)$$

$$M_{вз} = \frac{1}{2} \rho V_i^2 c_{M_{вз}} L_i^2 T_i, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $V$  – скорость хода судна ( $i=1,2$ ; индекс «1» относится к рассматриваемому судну, индекс «2» относится к судну-партнеру);  $c_{F_{вз}}, c_{M_{вз}}$  – безразмерные коэффициенты;  $L, T$  – длина и осадка судна соответственно.

Гидродинамические силы и моменты взаимодействия зависят от углов дрейфа ( $\beta_1, \beta_2$ ) и координат центра тяжести двух судов ( $x_{g1}, z_{g1}$ ) и ( $x_{g2}, z_{g2}$ ). Поэтому для расчета значений сил и моментов необходимо определить углы дрейфа ( $\beta_1, \beta_2$ ) и координаты центра тяжести двух судов ( $x_{g1}, z_{g1}$ ) и ( $x_{g2}, z_{g2}$ ). Расчет выполнен в пакете MATLAB-SIMULINK при применении MATLAB-FUNCTION, схема расчета представлена в Рис 1.

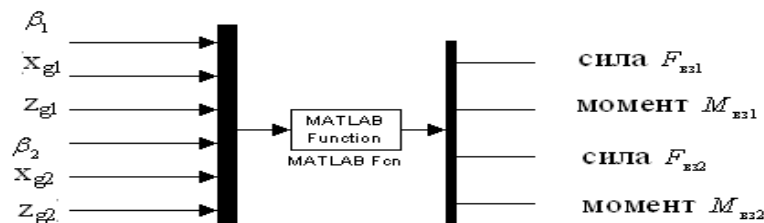


Рис.1.Схема расчета сил и моментов взаимодействия в MATLAB-SIMULINK

С точки зрения безопасности, приводят к рассмотрению вариантов столкновения между судами. На практике показывается что, наиболее опасной является ситуация, когда обгоняемое судно имеет значительные большие размеры, чем обгоняющее, а последнее движется в волновой области, образованной нагоняемым судном. Для

устранения возможности столкновения обгоняющее судно должно идти вне волновой области. Доказательство этого процесса представлено в результате моделирования первой главы работы.

Наиболее эффективным методом моделирования при наличии дифференциальных уравнений в среде MATLAB является метод использования S-функций. Схема моделирования при применении S-функции представляется на рис.2, (на входы блока S-функции подаются сигналы управления, на выходе будут кинематические параметры)

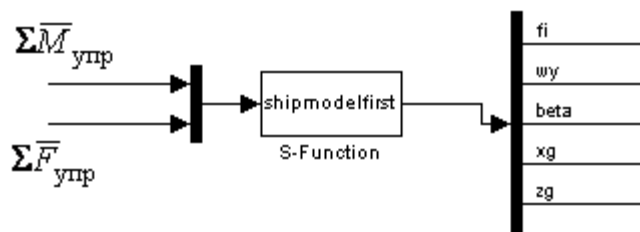


Рис.2. Схема моделирования при применении S-функции

Путем соединения блоков (блоки моделей судов (судно1, судно2); блок расчета сил и моментов гидродинамических взаимодействий, блок отображения диаграммами) можем моделировать процесс влияния сил и моментов на движения судов. Результат приведен на рис.3

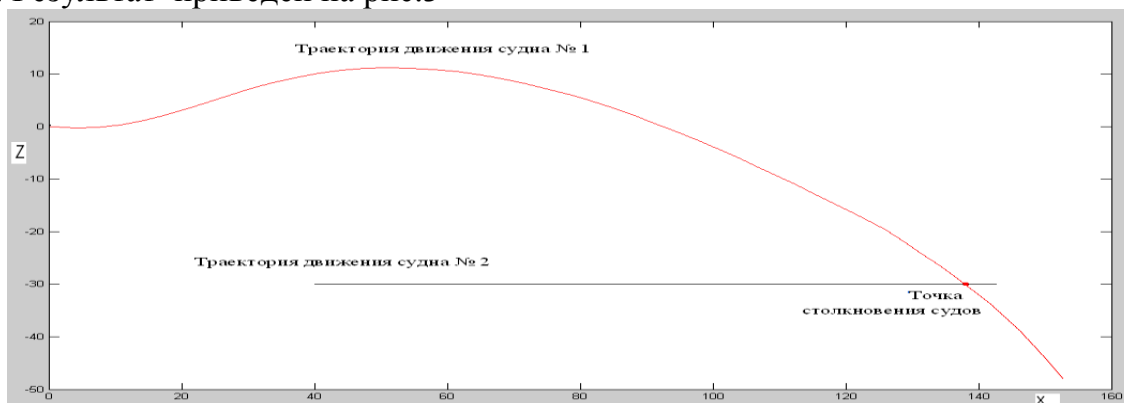


Рис.3 Движения двух судов с учетом гидродинамического взаимодействия между ними.

Во второй главе разработаны алгоритмы управления движением судна при сближении с другим судном и обоснованы требования к системам навигаций и ориентации при реализации вышеуказанных алгоритмов и решении задач управления движением МПО. Осуществляется имитация процесса управления движением судов при применении разработанного алгоритма.

Постановка задачи включает следующие цели управления движением:

-Движение судна на сближение с другим движущимся судном. В этом режиме необходимо : поддерживать заданные значения путевого угла управляемого судна по  $\sigma(t) = \varphi(t) - \beta(t) \rightarrow \sigma(t)_{зад}$ ; изменять координаты центра масс управляемого судна при постоянстве его путевого угла; поддерживать скорость его движения на заданном значении.

Для системы стабилизации на линии заданного галса при отсутствии внешних возмущений ( $w = 0$ ) можно использовать следующий критерий:

$$J = \int_0^{\infty} (\lambda_{\varphi} \varphi^2 + \lambda_{\beta} \beta^2 + \lambda_{\omega_y} \omega_y^2 + \lambda_{z_g} z_g^2 + \lambda_{\xi} \xi^2 + \lambda_u u^2) dt, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\varphi}, \lambda_{\beta}, \lambda_{\omega_y}, \lambda_{z_g}, \lambda_{\xi}, \lambda_u$  - весовые множители.

Исследуются законы управления вида

$$\begin{cases} U_1 = g_{11}\phi + g_{12}\omega_y + g_{13}\beta + g_{14}(z_g - z_{g0}) + g_{15} \int z_g \\ U_2 = g_{21}\phi + g_{22}\omega_y + g_{23}\beta + g_{24}(z_g - z_{g0}) + g_{25} \int z_g, \end{cases} \quad (5)$$

где  $g_{ij}$  – коэффициенты обратной связи;  $z_{g0}$  – отклонение, задающее траекторию, на которой необходимо стабилизировать судно.

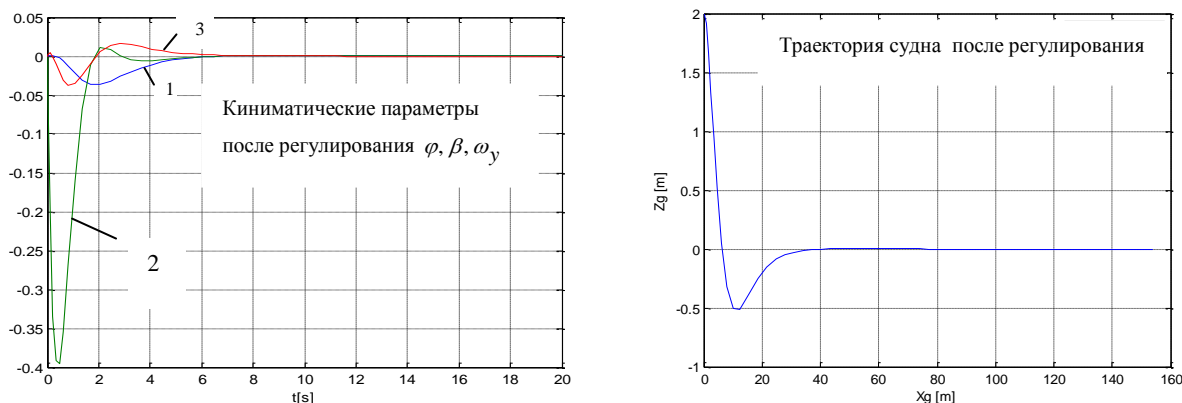
Стандартные методы многоканального синтеза регулятора реализованные в среде MATLAB функцией lqr(A,B,Q,R) (Linear-quadratic regulator design for state space systems- проектирование оптимального регулятора). Для поиска закона управления применяется прямая квадратичная задача с подбором матриц весовых множителей. В этом случае  $\lambda_\phi=0.5$ ,  $\lambda_\beta=0.2$ ,  $\lambda_{\omega_y}=0.2$ ,  $\lambda_{z_g}=0.5$ ,  $\lambda_\xi=0.5$ ,  $\lambda_u=0.2$ . Результат представлен в таблице 1.

таблица 1

Показатель	Закон управления (5)
Коэффициенты регулятора $g_{ij}$	$\begin{bmatrix} 1.6299 & 0.9956 & -0.3071 & -0.0790 & -0.0238 \\ -4.4576 & -0.3071 & 4.1843 & 1.2705 & 0.8161 \end{bmatrix}$

К альтернативному методу линейного синтеза относятся методы синтеза по заданным собственным частотам или синтез системы при применении теории модального управления. Модальное управление (синтез модальных регуляторов) можно определить как задачу управления, в которой изменяются моды (собственные числа матрицы объекта) с целью достижения желаемых цепей управления. В данной работе применим алгоритм оптимального управления одной модой при полных измерениях.

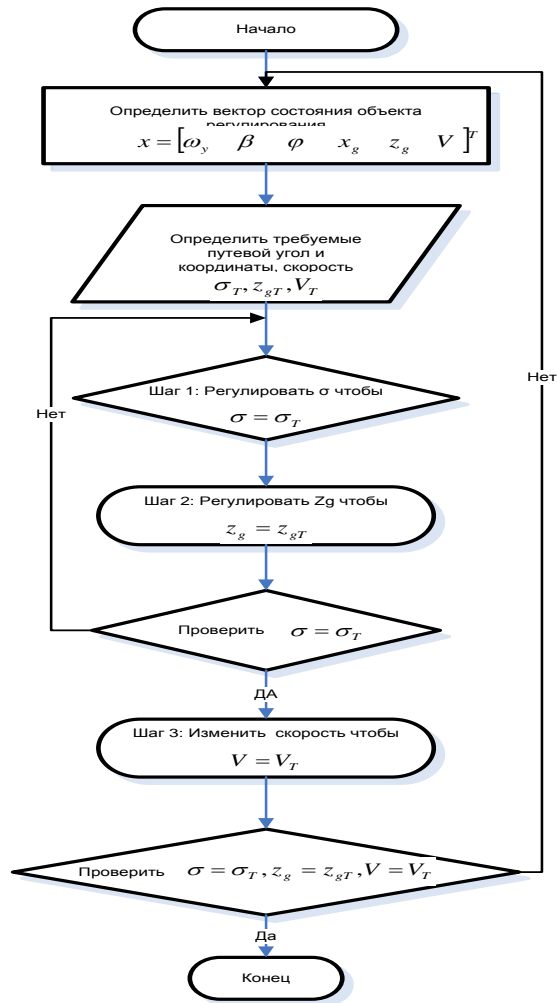
Поставим все значения коэффициентов регулятора в обратной связи системы управления, результаты моделирования движения в MATLAB представлены на рис.4.



**Рис.4.** Кинематические параметры (1– $\phi$ ; 2– $\beta$ ; 3– $\omega_y$ ) и траектория движения судна после стабилизации

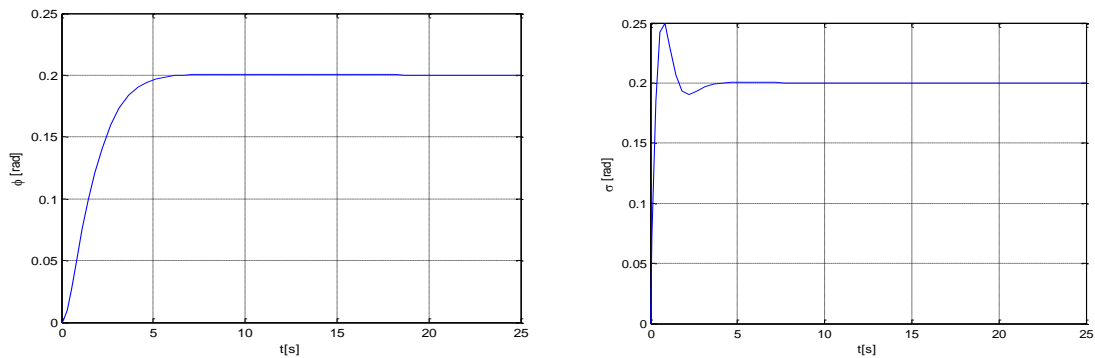
Задачу управления можно решить путем регулирования по шагам. Суть алгоритма заключается в том, что регулирование вектора состояния осуществляется поэтапно, при этом одновременно все компоненты вектора состояния не регулируются, а только один или два компонента (рис 5).





**Рис.5.** Алгоритм управления движением при режиме «абордаж»

В основе синтеза системы управления оптимальным линейным квадратичным регулятором лежит следующий алгоритм: для каждого шага определяем коэффициенты регулятора с помощью стандартной функции в MATLAB, на следующем шаге необходимо линеаризовать уравнения движения в новой точке балансирования и получить новые значения элементов матрицы А и В. Для поиска коэффициентов регулятора применим новые матрицы А и В. При исходных данных; когда заданный полевой угол  $\sigma_T = 6^0 = 0.2[rad]$  и заданная координата  $Z_g = 10[M]$ , результаты данного алгоритма представлен на рис. 6 и рис.7.



**Рис.6.** Полевой угол и угол рыскания после первого шага

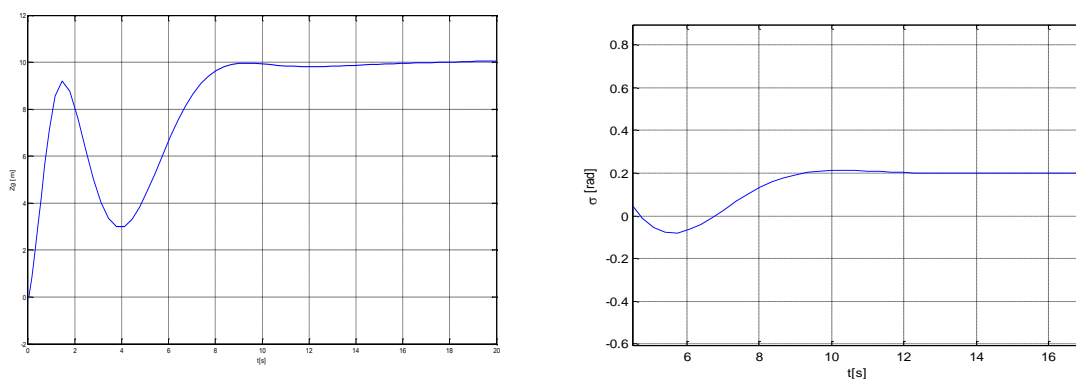


Рис.7 Zg и путевой угол после второго шага

Отметим, что легко увеличить или уменьшить скорость движения управляемого судна (судно №2) путем изменить силы тяги (увеличение или уменьшение подачи газа), вследствие этого следующий шаг: повышение (понижение) скорости осуществляется без применения оптимальных регуляторов и алгоритм решения является сравнительным быстродействием. Результат моделирования процесса регулирования при применении алгоритма представлен на рис.8

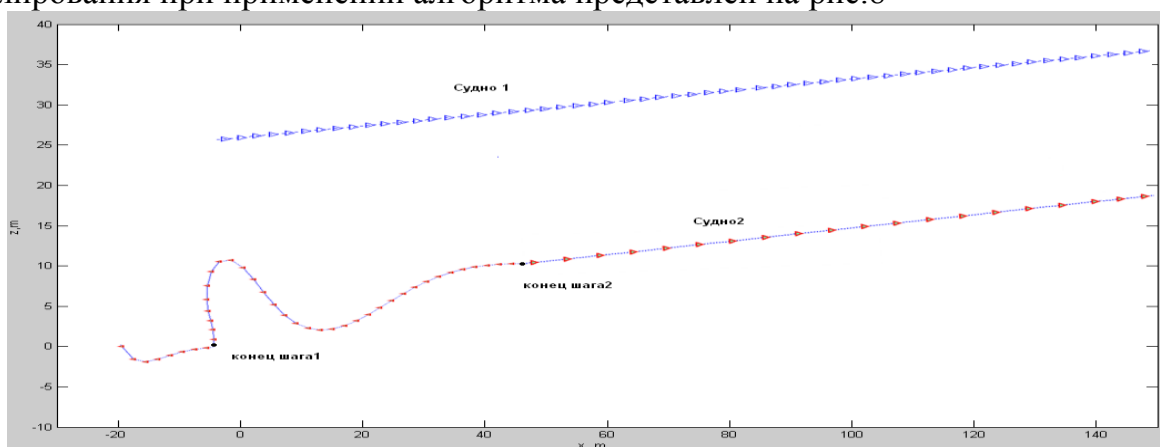


Рис 8 Изменения траектории судна 2 при регулировании.

В третьей главе излагаются компьютерные модели комплекса органов управления, при котором используется матрица конфигурации. Разработаны компьютерные модели внешних возмущений с помощью новых спектров волны, ветра и новых формул расчета коэффициента сил и момента ветра и так же разработаны модели собственного движения с блоком S-функции и скоростной математической модели движения судна. Обоснован метод моделирования движение судна в разных случаях при соединении всех созданных компьютерных моделей.

В данной главе предполагается использование общей формулы для всех видов средств управления и матрицы конфигураций данного комплекса. Известно, что любое средство управления создает свои силы и моменты, которые действуют на судно и изменяют его параметры движения.

Обозначаем вектор  $T = [R, M]^T = [R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z]^T$  -вектор сил и моментов действующих на судно

При  $r = [l_x, l_y, l_z]^T$  - вектор плеч сил, можем написать :

$$T = [R, M]^T = [R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z]^T = \begin{bmatrix} R \\ r \times R \end{bmatrix} = [R_x, R_y, R_z, R_y l_z - R_z l_y, R_x l_y - R_y l_x, R_z l_x - R_x l_z]^T.$$

Для НВК рассматривается только движение на горизонтальной плоскости, степень свободы равно трем ( продольное движение, боковой снос, рыскание ). Вектор Т можно переписать таким образом:

$$T = \begin{bmatrix} Rx \\ Rz \\ My \end{bmatrix} \stackrel{3DOF}{=} \begin{bmatrix} Rx \\ Rz \\ Rzlx - Rxlz \end{bmatrix}.$$

Каждое средство управления движением создает свой вектор силы. Чтобы определить характеристики средств управления, построим таблицу векторов сил и сигналов управления.

Таблица 2

Средство управления	$u$ -входящий сигнал управления	$\alpha$ - дополнительный сигнал управления	R-Вектор сил
Главный винт	Шаг винта и число оборотов вращения	–	$[R, 0, 0]$
Подруливающее устройство	Шаг винта и число оборотов вращения	–	$[0, 0, R]$
Поворотные винтовые колонки или КД	Шаг винта и число оборотов вращения	Угол поворота или угол перекладки руля	$[R \cos \alpha, 0, R \sin \alpha]$
Вертикальный руль	Угол перекладки	–	$[0, 0, R]$
Подводные крылья	Углы атаки крыльев	–	$[0, R, 0]$

Общая формула используемая для расчета силы и момента органов управления движения судном представляется в виде:

$$T = [R, M]^T = T(\alpha)R = T(\alpha)Ku, \quad (6)$$

где  $u \in R^r, \alpha \in R^p$  - векторы сигналов управления, при этом  $r$ -число средств управления,  $p$ -число ПВК или АДРК:

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T, u = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T.$$

$$\text{Матрица силовых коэффициентов } K = \text{diag}\{K_1, \dots, K_r\} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & K_r \end{bmatrix}.$$

при этом  $K_i, i = \overline{1, r}$  коэффициенты сил средств управления  $R = Ku$

Матрица конфигурации средств управления  $T(\alpha) \in R^{n \times r}$  определяется вектор столбцами  $t_i \in R^n$  где  $n$ -степень свободы, при  $n = 3$ , имеем формулы.

$$T(\alpha) = [t_1, t_2, \dots, t_r]$$

$$t_i = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \\ lx_i \sin \alpha_i - lz_i \cos \alpha_i \end{bmatrix}}_{\text{ПВК, КД}}, \quad t_i = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ lz_i \end{bmatrix}}_{\text{Главный винт}}, \quad t_i = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ lx_i \end{bmatrix}}_{\text{Подруливающее устройство}}, \quad t_i = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Подводные крылья}}$$

Матрица конфигурации средств управления вычисляется при заданных векторах углов управления  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T$  и плеча сил  $r = [lx, ly, lz]^T$ .

Из формулы (10) видно, что для расчета вектора сил и моментов комплекса средств управления движением (УД), кроме вычисления матрицы  $T(\alpha)$ , еще необходимо вычислить вектор силы, который создается каждым отдельным средством УД. В большинстве случаев гребной винт является главным двигателем, поэтому расчет силы создаваемой гребным винтом играет очень важную роль в данной задаче.

По результатам работы российских исследователей Рожественского (1970), Воскобовича (1991, 1999), и так же зарубежных исследователей Faltinsen (1980), Minsaas (1987), Smogeli (2006), общие формулы сил и моментов для номинального режима ( $T_{\text{вн}}, M_{\text{вн}}$ ) представлены в виде:

$$T_{\text{вн}} = \text{sign}(n) K_{T0} \rho D^4 n^2,$$

$$M_{\text{вн}} = \text{sign}(n) K_{M0} \rho D^5 n^2,$$

где  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]-плотность морской воды,  $K_{T0}, K_{M0}$  - коэффициенты упора и момента в номинальном режиме. В рабочих режимах общая формула силы и момента представлена в виде:

$$T_e = f_T(\cdot) = \text{sign}(n) K_{T0} \rho D^4 n^2 \beta_T(n, x_e, \theta_e) = \text{sign}(n) K_T \rho D^4 n^2,$$

$$M_e = f_M(\cdot) = \text{sign}(n) K_{M0} \rho D^5 n^2 \beta_M(n, x_e, \theta_e) = \text{sign}(n) K_M \rho D^5 n^2,$$
(7)

где  $K_T, K_M$  - коэффициенты упора и момента;  $\beta_T(n, x_e, \theta_e), \beta_M(n, x_e, \theta_e)$  - редуцированные коэффициенты

$$\beta_T(n, x_e, \theta_e) = \frac{T_e}{T_{\text{вн}}} = \frac{K_T}{K_{T0}},$$

$$\beta_M(n, x_e, \theta_e) = \frac{M_e}{M_{\text{вн}}} = \frac{K_M}{K_{M0}},$$

где  $n$  [об/мин] - скорость вращения вала,  $x_e$  - переменные состояния по времени (шаг винта, дополнительная скорость, глубина винта),  $\theta_e$  - фиксированные параметры винта (диаметр, геометрические параметры, место положения). Из формулы (7) можем создать блок компьютерной модели винта (рис.9).

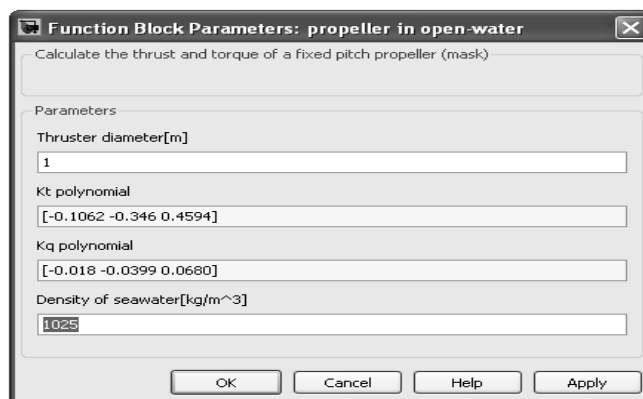


Рис.9. Блок гребного винта в MATLAB-SIMULINK

Благодаря блокам расчета сил каждого средства управления и матрицы конфигурации комплекса управления, принципиально можем создать блок расчета сил и моментов любого комплекса управления с любой сложностью.

В задаче управления движением МПО расчет внешних возмущении играет очень важную роль. Ветер и течение моделировать не особо трудно, так как в обоих случаях наблюдается горизонтальное перемещение частиц среды с постоянной средней скоростью потока. Создать модели волнения труднее много раз, поскольку необходимо вычислить много факторов, влияющих на процесс создания волнения.

В современной науке, расчет волны выполняется при использовании **двугорбого спектра морского волнения**. Наложение зыби на ветровую составляющую создает два «горба» в форме спектра волнения. При наличии нескольких компонент разнонаправленной зыби форма спектра может быть еще более сложное, иметь много «горбов». Для различных акваторий спектры соответствуют различным частотам «горбов» и направлениям распространения.

Общая структура расчетного спектра имеет вид :

$$S(\sigma_n) = \sum_{j=1}^2 E_j S_{jn}(\sigma_{jn}), \quad (8)$$

где  $E_j = (1/16)H_j^2 T_{pj}$  – амплитуда  $j$ -го «горба»,  $S_j(\sigma) = 3.26(\sigma T_{pj})^{-4} e^{-(\sigma T_{pj})^{-4}} \gamma_j(\sigma)$  – функция, описывающая форму «горба» в виде спектра JONSWAP,  $H_{sj}, T_{pj}$  – соответственно расчетные значительная высота волны и период, отвечающей части спектра  $j$ -го «горба»,  $\gamma_j(\sigma)$  – фактор, уточняющий форму  $j$ -го «горба»,  $j = 1, 2$ .

Для каждого из двух классов амплитуда и форма определяются через специальные расчетные параметры. Эти параметры являются типовыми для различных районов и условий волнения. При отсутствии этих данных рекомендованы значения, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

$a_f$	$a_e$	$a_u$	$a_{10}$	$a_1$	$k_g$	$b_1$	$a_{20}$	$a_2$	$a_3$
6.6	2.0	25	0.7	0.5	35	2	0.6	0.3	6

Формулы для расчета  $H_j, T_{pj}, \tilde{\gamma}_j$  приведены в таблице 4.

Таблица 4

$j$	Ветродоминирующее волнение	Волнение с доминированием зыби
1	$\varepsilon_l = (T_{pf} - T_p) / (T_{pf} - T_l); T_l = a_e H_s^{1/2}$ $H_{w1} = R_w H_s; R_w = (1 - a_{10}) e^{-(\varepsilon_l/a_1)^2} + a_{10}$ $T_{pw1} = T_p$ $\gamma = k_g s_p; s_p = (2\pi / g) H_{w1} / T_{pw1}^2$	$\varepsilon_u = (T_p - T_{pf}) / (T_u - T_{pf}); T_u = a_u$ $H_{s1} = R_s H_s; R_s = (1 - a_{10}) e^{-(\varepsilon_u/a_1)^2} + a_{20}$ $T_{ps1} = T_p$ $\gamma = \gamma_f (1 + a_3 \varepsilon_u); \gamma_f = k_g s_f^{6/7}; s_p = (2\pi / g) H_s / T_{pf}^2$
2	$H_{w2} = (1 - R_w^2)^{1/2} H_s; R_w = (1 - a_{10}) e^{-(\varepsilon_l/a_1)^2} + a_{10}$ $T_{pw2} = T_{pf} + b_1$ $\gamma = 1$	$H_{s2} = (1 - R_s^2)^{1/2} H_s; R_s = (1 - a_{10}) e^{-(\varepsilon_u/a_1)^2} + a_{20}$ $T_{ps2} = a_f H_{s2}^{1/3} \quad T_{ps2} = a_f H_{s2}^{1/3}$ $\gamma = 1$

**Вычисление сил и моментов морского волнения.** При определении сил и моментов морского волнения, действующих на судно в вертикальной плоскости,

можно считать их прямо пропорциональными продольной составляющей приведенного угла волнового склона  $\psi_\gamma(t)$ .

$$M_z = m_z \psi_\gamma(t); F_y = f_y \psi_\gamma(t) \quad (9)$$

где  $m_z, f_y$  – коэффициенты математической модели судна

Используя формулу (9) и метод расчет спектра волны, можем создать несколько блоков компьютерных моделей волны. Они представлены на рис.10, и результат расчета при использовании блока расчета волны с спектром двух пиков представлен на рис.11.

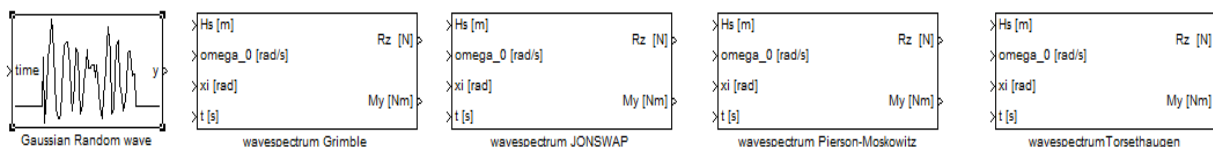


Рис.10. Блоки моделей волнения с разными спектрами

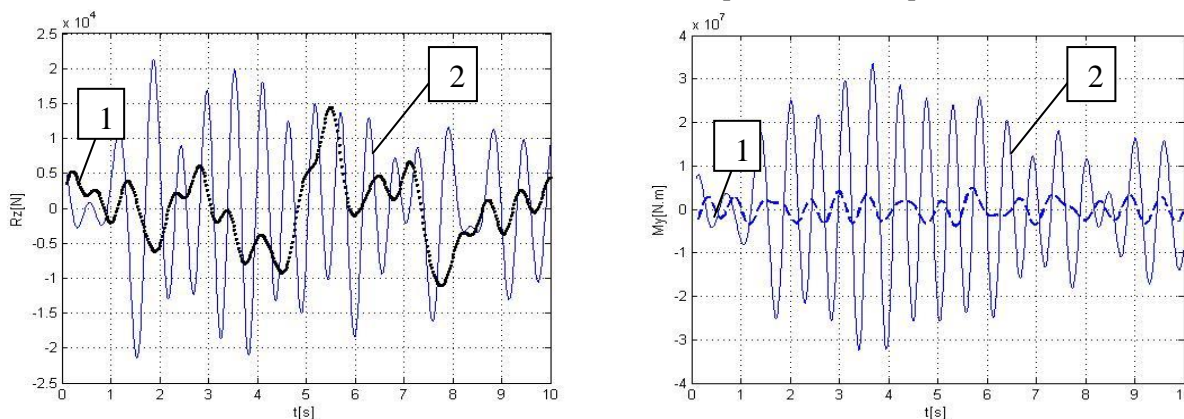


Рис.11 Расчет силы  $R_z(t)$  и момент  $M_y(t)$ ; 1- для стандартных спектров; 2- для двугорбовых спектров

*Ветер* представляет собой движение воздушного потока. Ветер характеризуется двумя главными параметрами: скоростью и направлением. Мгновенное значение скорости ветра над морем в общем случае представляет собой случайную функцию времени, которую можно считать стационарной для развитого ветрового процесса. Она образуется суммой средней величины  $W_y$  и переменной составляющей, которая, и свою очередь, состоит из турбулентной и волновой. В общем случае можно разделить ветер на два компонента: главный компонент представляет собой среднюю скорость ветра  $W_g$ , а второй переменный фактор.

Средняя скорость ветра зависит от высоты  $y$  от водной поверхности и может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{W_y}{W_{10}} = \frac{5}{2} \sqrt{k} \ln \frac{y}{y_0}; y_0 = 10 \exp\left(-\frac{2}{5\sqrt{k}}\right) \quad (10)$$

где  $W_{10}$  - средняя скорость ветра на высоте 10м в течение 1 час;  $k$  - коэффициент дрейфа волновой поверхности, обычно  $k = 0.0026$

Второй переменный компонент (включается турбулентной и волновой ветер) более сложно вычислить и является случайной функцией времени. Для расчета предлагаются два известного спектра: спектр Харриса (Harris) и Норсока (Norsok).

Спектр Харрис создан на основе результатов измерения ветра над землей, а спектр Норсок на основе измерения ветра над морем

$$\text{Спектра Харриса определяется формулой: } S(f) = \frac{4kLW_{10}}{(2 + f_1^2)^{5/6}}; f_1 = \frac{Lf}{W_{10}},$$

где  $L$  - Масштабирование длины,  $k$  –коэффициент ветра и  $f$  -частота в Гц  
 Форма спектра Норсока в зависимости от числа  $z$ :

$$S(f) = 320 \frac{\left(\frac{W_{10}}{10}\right)^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.45}}{(1 + x^n)^{5/3n}}, n = 0.468;$$

$$x = 172 f \left(\frac{z}{10}\right)^{2/3} \left(\frac{W_{10}}{10}\right)^{-3/4}.$$

Получим общую формулу для скорости ветра

$$W = W_y + W_g = W_y + \sum_{i=1}^N W_{gi}(t) = W_y + \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \phi_i).$$

Аэродинамические силы и моменты, действующие на судно зависят от скорости  $W$  [м/с] и угла встречи с направлением ветра  $\gamma_r$  [градус]:

$$\left. \begin{aligned} R_x &= 0.5\rho_a W^2 A_T C_x(\gamma_r), \\ R_z &= 0.5\rho_a W^2 A_L C_z(\gamma_r), \\ M_y &= 0.5\rho_a W^2 A_L L C_M(\gamma_r), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $C_x(\gamma_r), C_z(\gamma_r)$  - коэффициенты силы,  $C_M(\gamma_r)$  -коэффициент момента,  $A_T$  - поперечная площадь проекции судна в связанной системе координат,  $A_L$  - боковая площадь проекции судна в связанной системе координат,  $L$  -длина судна.

Из выражения расчета скорости ветра и выражения расчета силы и момента ветра можем создать компьютерные модели ветра.

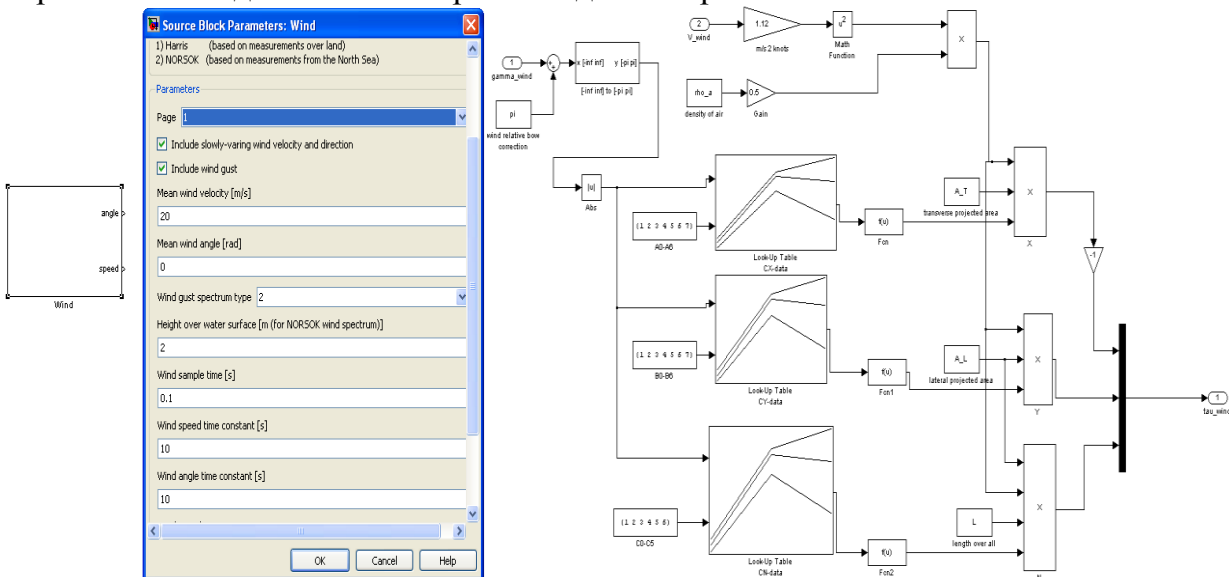


Рис.12. Блок расчета силы  $R_z(t)$  и момента  $M_y(t)$  ветра.

Отметим, что чтобы разрабатывать компьютерную модель движения судна, необходима разработка математической модели судна. В данной главе, в качестве

примера, используется система дифференциальных уравнений, описывающих боковое движение судна по курсу:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_x &= \frac{Q_x}{m(1+k_{11})}, \\ \dot{V}_z &= \frac{J_{xx}(1+k_{44})Q_z - mk_{34}N_x}{mJ_{xx}(1+k_{33})(1+k_{44}) - m^2k_{34}^2}, \\ \dot{\omega}_y &= \frac{N_y}{J_{yy}(1+k_{55})}, \\ \dot{x} &= V_x \cos \varphi + V_z \sin \varphi, \\ \dot{z} &= -V_x \sin \varphi + V_z \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $m$  - масса судна,  $k_{11}$  - коэффициент присоединенной массы,  $J_{xx}, J_{yy}$  - момент инерции относительно оси OX и OY. Через  $Q_x, Q_y, N_x, N_y$  обозначены соответственно проекции сил и моментов действующих на судно, на оси связанной системы координат. Эти проекции определяются следующими соотношениями:

Вставим значения заданных параметров в выражения (12), и введен эти выражения в программу S-функции в MATLAB-SIMULINK, в результате получим компьютерную модель судна для моделирования, график моделирования с этой моделью представлены на рис.13.

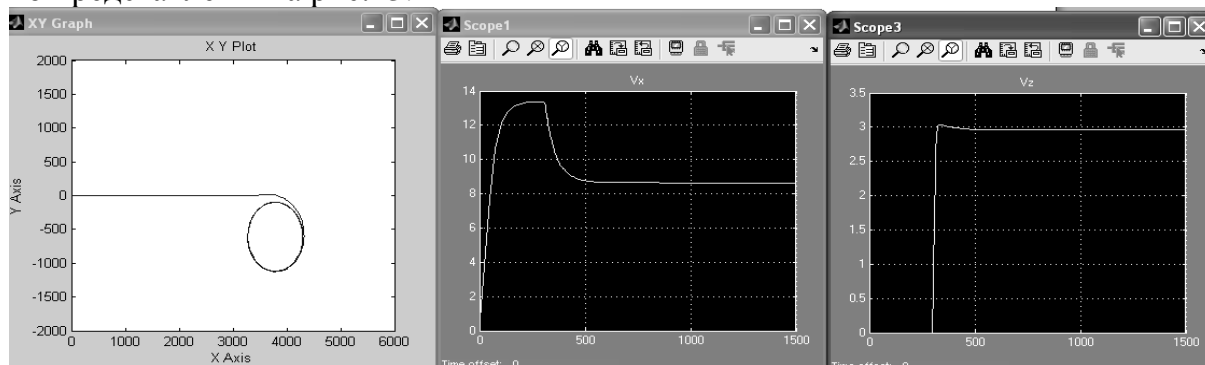


Рис.13.Результат моделирования режимом циркуляции после разгона

**В четвертой главе** произведен анализ методов оптимизации, осуществлена разработка алгоритма и метода оптимального распределения управляющих сил и моментов между исполнительными органами судна в режиме динамического позиционирования(ДП).

Задачу распределения ресурсов управления можно рассматривать как задачу оптимизации на условный экстремум: необходимо определить неизвестные управляющие функции  $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ , доставляющие минимум функции  $J(t) = \sum f_i^T(t) \cdot \lambda_i(t) \cdot f_i(t)$ , при ограничениях-равенствах  $F_{ynp}(t) = \sum f_i(t)$ ,  $M_{ynp}(t) = \sum x_i f_i(t)$  и ограничениях, накладываемых на все органы управления.

На практике синтез управляющих воздействий исполнительными органами осуществляется раздельно по плоскостям в системе координат ( $G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$ ):



$$F_{xynp}(t) = \sum f_{xi} ;$$

$$F_{zynp}(t) = \sum f_{zi} ;$$

$$M_{zynp}(t) = \sum (f_{xi}x_{ci} - f_{zi}z_{ci}) ;$$

где  $f_{xi}, f_{zi}$  – соответствующие проекции вектора тяги  $f_i$  в плоскости Gxz;  
 $x_{ci}, z_{ci}$  – координаты точки приложения тяги.

В результате работы, получена математическая модель системы динамического позиционирования и реализация в программе Matlab. Программа состоит из 4-х подпрограмм: расчета сил и моментов управления при использовании уравнения Риккати; распределения управляющих воздействий по органам управления с помощью метода Нелдера-Мида; расчета сил и моментов для каждого органа управления и для уравнений модели судна ; главная подпрограмма соединения трех предыдущих подпрограмм. Результат моделирования представлен на рис. 14.

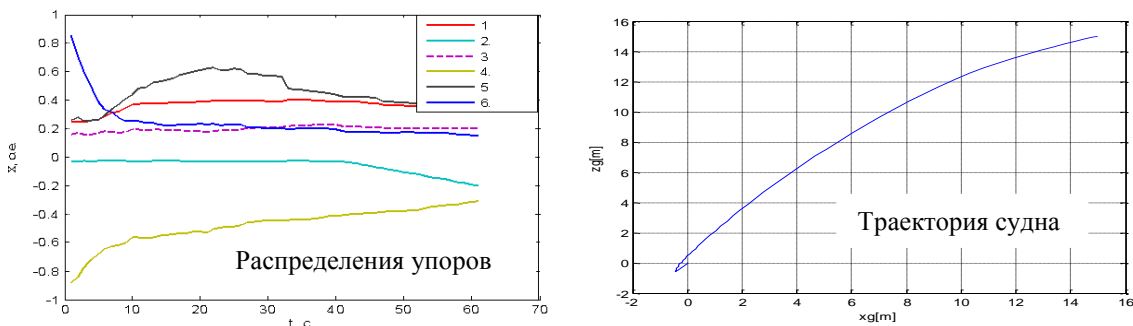


Рис. 14. Распределения упоров и траектория выхода судна из заданной точки в точку позиционирования.

Результат моделирования траектория судна в режиме ДП относительно подвижной точки представлен на рис 15. Судно №1 (в графике Ship 1) движется с постоянной скоростью, судно № 2 (в графике Ship 2) после выхода в точку позиционирования движется параллельным курсом на постоянном траверсном расстоянии.

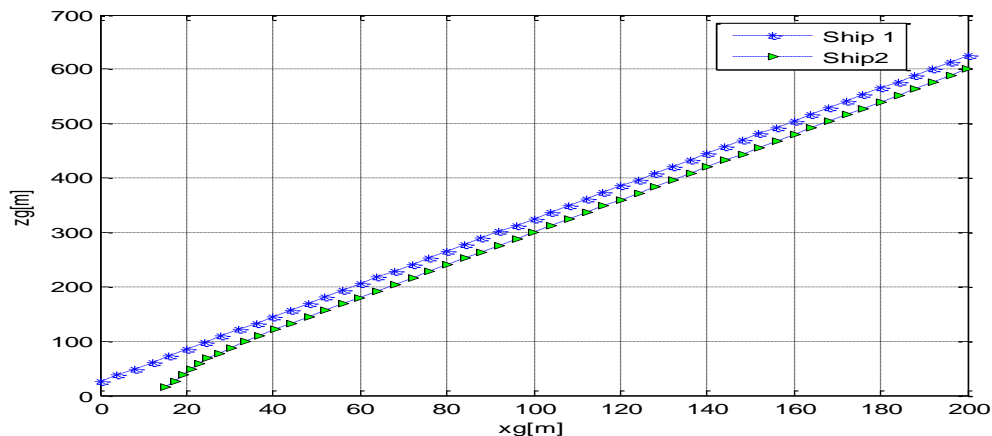


Рис 15. Траектория судна в режиме ДП относительно другого судна

**В заключении** сформулированы основные результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложены математические модели движения судов с учетом гидродинамического взаимодействия между ними, формализованные для использования в среде MATLAB. Сформулирована и решена задача стабилизации движения судна при сближении с другим судном.

2. Обоснованы алгоритмы координированного управления движением судна при сближении с другим судном. Сформулирована и решена задача непрямого квадратичная задача, совмещающая в себе достоинства модального синтеза систем управления с возможностью достижения оптимального управления движением судна.

3. Описаны и анализированы современные органы управления для судна и предложена схема установления. Обоснована общая формула для расчета сигналов управления комплекса исполнительных органов. Предложены две модели винта, несколько новых спектров для волны и ветра, и так же два метода расчета и моделирования их сил и моментов.

4. Предложены компьютерные модели органов управления, внешних возмущений, собственного движения судов. Обосновывается схема моделирования движения судна в разных режимах при использовании этих моделей.

5. Обоснованы оптимальные методы распределения управляющих сил и моментов между исполнительными органами судна при координированном управлении движением судна в режиме динамического позиционирования.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Ха Мань Тханг, Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г., Боронахин А. М., Чан Т. Д., Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов // Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012 №2 С.24-28.

2. Ха Мань Тханг, Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г., Боронахин А. М., Чан Т. Д., Курсоверткаль для задач управления движением скоростного судна // Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012 №4 С.75-80.

3. Ха Мань Тханг, Шпекторов А.Г., Моделирование сил и моментов морского волнения // Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013 №2 С.43-49

Другие публикации:

4. Ха Мань Тханг, Шпекторов А.Г. Компьютерная модель морского подвижного объекта в среде MATLAB // Сборник конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Электроприбор. Спб 2011. С.284-290

5. Ха Мань Тханг, Н. К. Чьен, В. П. Казаков, Е. В. Белградская, Непрямые адаптивные системы управления двухмассовым упругим электромеханическим объектом с параметрически настраиваемыми моделями // XIII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2011 г. СПб.:2011г