

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ – ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

Сюэ Юаньюань

Выпускная квалификационная работа аспиранта

**Цифровое управление движением беспилотных
морских судов с автоматическим обходом
препятствий**

Направление 09.06.01 "Информатика и вычислительная техника"

Программа МК.3021.2014 "Системный анализ, управление и
информатика"

Научный руководитель,
доктор физ.-мат. наук,
профессор

Веремей Е. И.

Рецензент,
кандидат физ.-мат. наук

Утенкова-Якушева Д. Б.

Санкт-Петербург

2018

Содержание

Введение	3
Постановка задачи	8
Обзор литературы	9
Глава 1. Уравнения движения МПО	11
1.1. Системы координат.....	11
1.2. Линеаризация системы.....	20
Глава 2. Формирование алгоритмов управления движением МПО для обхода препятствий	23
2.1. Способ вычисления минимальных расстояний.....	27
2.2. Реализация вычисления минимальных расстояний в программной среде MATLAB.....	29
2.3. Реализация компьютерной модели в среде Simulink.....	37
2.4. Исследования с помощью компьютерной модели.....	40
Выводы	43
Заключение	44
Список использованной литературы	45
ПРИЛОЖЕНИЕ	46

Введение

Развитие судоходной отрасли с XV века значительно определялось разделением международной экономической деятельности, общества и природной среды. Из-за того, что имеет место отделение рынка труда от потребительского рынка при удаленности производства товаров, процессы обработки продуктов на разных этапах и их продажа осуществляется в совершенно разных регионах мира. Такая структура производства и потребления способствуют развитию судоходной отрасли с постоянным снижением стоимости перевозок. В свою очередь, снижение стоимости доставки обратно повлияла на развитие структуры производства. Это влияние привело к тому, что Китай, регионы Восточной и Юго-Восточной Азии, характеризующиеся особыми рынками труда, завоевали титул мировой фабрики. Такой способ производства является одним из важнейших факторов, способствующих процветанию услуг судоходства в регионе Дальнего Востока.

Среди многих видов транспорта, современное судоходство существенно отличается от авиаперевозок, железнодорожного и автомобильного транспорта. Это связано с тем, что его транспортные характеристики, определяемые огромным объемом грузов, далеко не всегда доступны другим видом транспорта. Особую роль играют низкие транспортные издержки, что определяет значительный вес судоходства на рынке перевозки товаров. В международной торговле перевозки с использованием судоходства является общедоступным, исключительно популярным видом транспорта.

С развитием мировой экономики, торговли и масштаба международных импортных и экспортных услуг, существенно повысилась важность морского судоходства в области товарных перевозок. Однако увеличение количества судов на существующих маршрутах вызывает значительные трудности в обеспечении безопасности морского судоходства. Согласно статистическим данным Port of Hamburg, пропускная способность контейнеров из 30 крупнейших портов мира увеличилась с 188 млн. контейнеров в 2004 году до 367 млн. контейнеров в 2015 году и почти удвоилась за 10 лет.

Рост контейнерных перевозок приводит к соответствующему увеличению плотности судов на маршруте. На оживленных маршрутах этот рост увеличился более, чем в два раза. Например, плотность потока судов увеличилась в несколько десятков раз на маршрутах Дальний Восток – Северная Америка, Западная Европа – Северная Америка, Восточная Азия – Юго-Восточная Азия и Дальний Восток – Персидский залив – Европа. При такой плотности маршрутов движения судов естественным образом стали возникать проблемы с беспрецедентными требованиями к вопросам обеспечения безопасности при обходе различных препятствий в процессе плавания.

В былые времена, для безопасного плавания по океану специализированное управление судом для обхода препятствий могло выполняться один раз в течение несколько дней. Такое управление вполне возможно реализовать вручную с предварительным планированием маршрута с большим количественным запасом. Однако в настоящее время, опираясь на существующие способы маневрирования, чтобы избежать препятствий при высокой плотности

движения судов, несомненно, потребуются весьма высокие затраты человеческих сил, и они будут постоянно увеличиваться.

Кроме того, определенный произвол операторов и ошибки ручного управления, порождают большие проблемы с безопасностью судоходства. Для решения задач по обходу препятствий традиционные способы, основанные на предварительно спланированном маршруте и ручном управлении, с трудом обеспечивают достижение поставленных целей. Это связано с тем, что не только сложные условия плавания, но и движения возможных динамических препятствий заранее не предсказуемо. С увеличением сложности задачи существенно увеличивается объем вычислительных работ по планированию маршрута, причем требования к вычислительным ресурсам увеличиваются со скоростью геометрической прогрессии. Задачи планирования маршрута с учетом требований по безопасному обходу препятствий становится не решаемыми с помощью традиционных ручных методов.

Актуальность развития исследований в данной области определяется следующими двумя важнейшими обстоятельствами.

Во-первых, современные вычислительные системы, а также инструментальные программные средства, определяют непрерывно растущие возможности для существенного повышения эффективности и качества работ по исследованию и проектированию систем управления движением судов и других морских подвижных объектов МПО. Это позволяет по-новому решать комплекс вопросов, относящихся к сфере моделирования, анализа систем, оптимизации

прокладки маршрута плавания и формирования управления для обхода препятствий с учетом погодных условиях.

Современные вычислительные системы и компьютерные технологии всё шире применяются на борту судна для решения различных технологических задач. В частности, используются новейшие спутниковые и инерциальные навигационные системы, позволяющие с высокой точностью определять положение подвижных объектов в пространстве.

Во-вторых, с развитием человеческого общества и с появлением новых технических средств, существенно расширился набор требований, предъявляемых к системам автоматического управления. Это соответствует очевидному желанию значительно повысить эффективность и качество функционирования системы управления движением МПО, которые эксплуатируются в постоянно усложняющихся организационных и транспортных условиях, что особо значимо для безопасности судоходства.

Одним из наиболее важных направлений исследований является формирование алгоритмов оптимального управления, обеспечение высокого качества и безопасности плавания, проведение имитационного моделирования и обеспечение технической реализации проектируемых систем на современной цифровой элементной базе.

Целью данной выпускной работы является формирование надежных и гибких алгоритмов автоматической прокладки маршрутов с обеспечением обхода препятствий. Эти алгоритмы формируются на основе существующих систем удержания судов на заданном курсе

(морские автопилоты), ориентированные на применение в беспилотном рабочем режиме движения. Подлежат рассмотрению также и более простые варианты задач по обходу препятствий с использованием автопилота в менее и более сложных ситуациях с оптимизацией управления движением судна.

Представляет также интерес решение задачи о коррекции (исправлении) маршрута движения судна в соответствии с погодными условиями в локальном районе и фактическим положением препятствий для оптимального достижения цели плавания. Методы, представленные в данной работе, должны обладать хорошей адаптируемостью и устойчивостью к изменениям условий движения. В соответствии с выбором заданного порога безопасности, должны быть получены результаты с использованием соответственных ограничений на управляющие воздействия и другие факторы, с проведением соответствующей оптимизации.

В качестве базовой инструментальной среды, поддерживающей разработку компьютерных моделей и выполнение имитационного моделирования, в выпускной работе принята широко распространенная система MATLAB – Simulink.

Постановка задачи

В данной области исследования многие ученые проделали большую работу, а также получили довольно много результатов и практических решений. Среди опубликованных результатов существует метод обхода препятствий с помощью построения искусственных потенциальных полей, которые используются для описания препятствующих объектов, чтобы выбрать лучшие маршруты обхода препятствий путем снижения потенциальной энергии с максимальной скоростью. Также существуют методы с использованием алгоритмов, такие как нейронные сети, генетические алгоритмы.

Из-за различий в представлении навигационных зон существуют также различные требования к безопасности судоходства и к условиям предотвращения столкновений с препятствиями. Внутриводные маршруты и океанские маршруты принципиально различны. Во внутриводных маршрутах потребуется достаточно много поворотов судна, и существуют сложные ситуации задачи обхода препятствий. Наоборот, океанский маршрут обычно более простой и гладкий, и количество кораблей невелико. Поэтому разные аспекты алгоритма для задачи обхода препятствий также требуют разных подходов.

Выбор соответствующих технических требований должен быть согласован с имеющимися вычислительными ресурсами, чтобы не вызвать их чрезмерное потребление. Это определяет обоснованное формирование управляющих воздействий для решения задачи обхода препятствий с предотвращением высоко опасных «аварийных ситуаций».

Обзор литературы

С развитием мировой экономики и судоходной отрасли, развивались также и научные исследования в области планирования оптимальных маршрутов и методов обхода препятствий для обеспечения безопасности плавания судов. Многие методы из различных областей научного исследования приняли для решения данной проблемы.

Но, прежде всего, исследования по автоматизации движения судов и их динамических характеристик не менее важно, как фундамент для других научных исследовательских работ.

Существует огромное количество работ по улучшению динамических характеристик, в том числе следующие работы: Войткунский Я. Я., Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов [1], Веремей Е.И., Корчанов В.М., Коровкин М.В., Погожев С.В. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов [2], Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами [3], Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов[4] и многие другие.

Нет никаких сомнений в том, что проведение исследования в данной области привело к существенному улучшению качественных и количественных показателей разработки МПО, и способствовали развитию систем управления их плаванием.

Улучшения механических структур, определяемых развитием теории автоматического управления и компьютерных технологий,

методы синтеза законов управления продолжают непрерывно развиваться. В качестве примера, можно привести работу Дмитриева С. П., Пелевина А. Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории[5], в которой приведены исследования возможностей улучшения качества динамики процессов управления движением МПО.

Для улучшения оценки потери скорости при повороте, провели исследование для задачи обхода препятствий Li Z., Zhang X., Jia Y., исследования по снижению скорости в процессе возвращения судна [6], Davidson K.S.M. On the turning and steering of ship[7], и Shiba H. Model experiments about the maneuverability and turning of ships[8]. И для решения задачи обхода препятствий, привели разные способы из различных областей Chang K. Y. □ Jan G. E, Parberry, I. A. method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts [9], Gen H., Проблемы О создании буферов на основе системы ГИС [10], Tang Q. Алгоритм оптимизации маршрута на основе электронных диаграмм [11].

Глава 1. Уравнения движения МПО

1.1. Системы координат

Для исследование задачи управления движением МПО для обхода препятствий во время судоходства необходимо задать систему дифференциальных уравнений движения судов, которая описывается движение в горизонтальной плоскости при разных начальных условиях. С помощью полученной системы точно определяют предсказание положения судна, и эффективность управляющих воздействий по обходу препятствий. Прежде всего, для задания дифференциальных уравнения для движения судна в горизонтальной плоскости, следует выбрать подходящую систему координат для анализа динамической системы МПО.

Для вывода уравнений динамики МПО используются различные системы координат [1–4]. Это связано с тем обстоятельством, что указанные уравнения принято представлять в скалярной форме, хотя все силы и моменты, действующие на МПО, а также порождаемые ими ускорения, скорости и перемещения по своей природе являются векторами трехмерного пространства.

В данном случае для исследования моделирования динамики управления движением морского подвижного объекта чаще всего используется связанная пространственная система координат [2]. Эта система наиболее удобна для проектирования на её оси линейных и угловых скоростей, а также сил и моментов, действующих на МПО. Начало этой системы помещается в центре масс МПО: она постоянно движется в пространстве, поскольку и начальная точка, и координатные

оси постоянно перемещаются вместе с объектом, причем оси координат вращаются вместе с МПО.

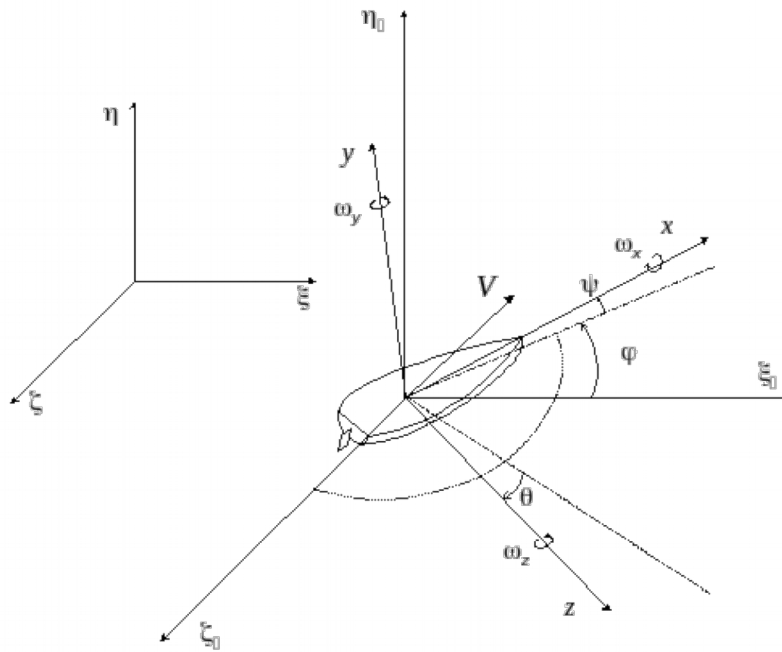


Рис. 1. Системы координат.

Оси O_x и O_y лежат в *продольной* (диаметральной) плоскости симметрии МПО, причем первая из них направлена к носу (*продольная ось*), а вторая – к верхней части МПО (*нормальная ось*). Ось O_z (*поперечная ось*) дополняет систему до правой и вместе с осью O_x лежит в плоскости *палубы* МПО, а вместе с осью O_y – в *поперечной* плоскости, или плоскости *шпангоута*, что показано на рис. 1.

Для определения места положения МПО в трехмерном пространстве, необходимо использовать полусвязанной системой координат (*промежуточная земная*) $O\xi_1\eta_1\zeta_1$. Эта система так же является подвижной, поскольку ее начало жестко связано с центром

масс МПО и перемещается вместе с ним в пространстве. Однако оси этой системы координат в процессе движения МПО имеют фиксированную пространственную ориентацию. Они либо параллельны соответствующим осям базовой земной системы координат, либо развернуты в горизонтальной плоскости на некоторый фиксированный курсовой угол.

Процесс управления движением МПО для обхода препятствий во время его плавания заключается в том, чтобы отрегулировать положение судна и его динамическое состояние, например, кардинальное положение судна и угол поворота, в течение планируемого периода времени, скорректировав скорость судна и угловую скорость движения в нужное время. Для данной пользы обозначим *Угол рыскания (курса) φ* – это угол между проекцией оси O_x связанной системы на горизонтальную плоскость и осью $O_{\xi 1}$. Угол курса будет положительным при повороте объекта на левый борт относительно направления движения, задаваемого осью $O_{\xi 1}$. Его значение принадлежит в интервале $[-180,180)$.

Угол крена θ – это угол между диаметральной плоскостью связанной системы и той вертикальной плоскостью, в которой находится ось O_x . Угол будет положительным при крене МПО на правый борт. Его значение принадлежит в интервале $[-180,180)$. *Угол дифферента ψ* – это угол между осью O_x связанной системы и горизонтальной плоскостью. Положительное значение угла определяется дифферентом на корму (поднятием носа МПО).

Возможность упрощения уравнений динамики определяется также тем, что надводные МПО обычно обладают симметрией относительно диаметральной плоскости, а главные оси инерции для них совпадают с координатными осями. Кроме того, отметим, что при формировании гидродинамических коэффициентов здесь можно допустить линейную зависимость демпфирующих сил и моментов от соответствующих линейных и угловых скоростей. Справедливы также и общие допущения, традиционные для теории качки кораблей, состоящие в том, что:

а) давление в каждой точке погруженной поверхности судна равно давлению в соответствующей точке волны;

б) возможно разделение действующих на судно гидродинамических сил на составляющие потенциальной и вязкостной природы;

в) набегающие на судно волны имеют малый угол склона.

При выводе приводимых ниже уравнений движения судна использованы базовые положения работ [1, 2, 6].

Рассмотрим математическую модель МПО данного класса на примере сухогруза, основные физические характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика	Единицы измерения	Величина	Обозначение
Водоизмещение	м ³	4500	W
Масса	тс·с ² /м	468.0	M
Длина	м	134.0	L
Ширина на миделе	м	16.6	B
Осадка на миделе	м	5.44	D
Момент инерции относительно продольной оси	тс·м·с ²	7639.3	J_{xx}
Момент инерции относительно вертикальной оси	тс·м·с ²	420170	J_{yy}
Коэффициент присоединенной массы вдоль оси Oх		0.020	k_{11}
Коэффициент присоединенной массы вдоль оси Oz		0.616	k_{33}
Коэффициент присоединенного момента инерции вдоль оси Oх		0.503	k_{44}
Коэффициент присоединенного момента инерции вдоль оси Oy		0.527	k_{55}
Коэффициент присоединенной массы относительно осей Oy и Oz		0.310	k_{34}
Коэффициент демпфирования бортовой качки		0.340	$\mu(\theta_0)$
Максимальная скорость	м/с	15	V
Плечо руля	м	61.65	L_R
Поперечная метацентрическая высота	м	1.11	h_o
Плечо сил инерции	м	4.57	z_k

Система дифференциальных уравнений, описывающих боковое движение судна по курсу и крену, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_x &= \frac{Q_x}{m(1+k_{11})}; \\
 \dot{V}_z &= \frac{J_{xx}(1+k_{44})Q_z - mk_{34}N_x}{mJ_{xx}(1+k_{33})(1+k_{44}) - m^2k_{34}^2}; \\
 \dot{\omega}_x &= \frac{k_{34}Q_z - (1+k_{33})N_x}{mk_{34}^2 - J_{xx}(1+k_{33})(1+k_{44})}; \\
 \dot{\omega}_y &= \frac{N_y}{J_{yy}(1+k_{55})};
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Как было сказано выше, при рассмотрении динамики водоизмещающих надводных МПО угол дифферента можно считать малой величиной. Поэтому, в соответствии с уравнениями (1.30), имеем соотношения, которые задают связь между кинематическими параметрами объекта в неподвижной и связанной системах координат:

$$\begin{aligned}
 \dot{\xi} &= V_x \sin \varphi + V_z \cos \theta \sin \varphi; \\
 \dot{\zeta} &= -V_x \cos \varphi + V_z \cos \theta \cos \varphi; \\
 \dot{\theta} &= \omega_x; \\
 \dot{\varphi} &= \omega_y.
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Уравнения (1.1) и (1.2) составляют единую систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих боковое движение судна. Здесь использованы следующие обозначения: V_x , V_z и ω_x , ω_y — проекции векторов линейной и угловой скорости на оси связанной системы координат; ξ — продольное перемещение центра масс по направлению движения; ζ — боковое смещение центра масс; θ — угол крена; φ — угол курса. Через Q_x , Q_z и N_x , N_y обозначены

соответственно проекции сил и моментов, действующих на судно, на оси связанной системы координат. Эти проекции определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 Q_x &= -m(1+k_{33})V_z\omega_y + 1.8T - X_H - X_R + F_x; \\
 Q_z &= Z_H + Z_R + F_z; \\
 N_x &= -\mu J_{xx}\omega_x - mgh_0 + z_k mV_x\omega_y + M_{xH} + M_{xR} + M_{xRb} + M_x; \\
 N_y &= M_{yH} + M_{yR} + M_y;
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

В приведенных формулах для сил и моментов через X_H , Z_H , M_{xH} , M_{yH} обозначены проекции гидродинамических силы и момента вязкостной природы, действующих на корпус судна, а через X_R , Z_R , M_{xR} , M_{yR} , M_{xRb} обозначены проекции силы и момента, обусловленных перекладкой рулей, T – тяга гребного винта. Формулы для перечисленных сил и моментов приведены ниже. И, наконец, через F_x , F_z , M_x , M_y обозначены проекции на оси связанной системы векторов внешней возмущающей силы и момента (аэродинамические силы и моменты, силы и моменты от волнения).

Проекции основной гидродинамических силы и момента, которые включены в (1.2), определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 X_H &= 0.50294V^2; \\
 Z_H &= 4.89V_L^2\beta + 9.644V_L^2\Omega\sqrt{1-\Omega^2} + 23.7V_L^2\beta|\beta|; \\
 M_{xH} &= -11.39V_L^2\beta - 22.474V_L^2\Omega\sqrt{1-\Omega^2} - 55.23V_L^2\beta|\beta|; \\
 M_{yH} &= -322.61V_L^2\beta - 223.6V_L^2\Omega + 69.1V_L^2\Omega|\beta| - 160.8V_L^2\Omega|\Omega|,
 \end{aligned}$$

где

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}, \quad V_L = \sqrt{V^2 + \omega_y^2 L^2}, \quad \Omega = \frac{\omega_y L}{V_L}, \quad \beta = -\arctg \left\| \frac{V_z}{V_x} \right\|.$$

Тяга гребного винта вычисляется по формуле

$$T = 9.740n^2 - 2.23Vn,$$

где n – число оборотов гребного винта.

Проекции гидродинамической силы и момента, обусловленные перекладкой руля, имеют вид:

$$X_R = 0.462\alpha^2 V_{LR}^2;$$

$$Z_R = 1.236V_{LR}^2\beta - 0.567V_{LR}^2\omega - 1.236V_{LR}^2\delta_v;$$

$$M_{xR} = -3.91V_{LR}^2\beta + 1.79V_{LR}^2\omega + 3.91V_{LR}^2\delta_v;$$

$$M_{yR} = 156.93V_{LR}^2\beta - 29.9V_{LR}^2\omega - 156.93V_{LR}^2\delta_v;$$

$$M_{xRb} = 9.0V^2\delta_b - 36.05V\omega_x;$$

где δ_v – угол перекладки вертикального руля, δ_b – угол перекладки

бортовых рулей, $\alpha = \delta_v - \left[\beta - \frac{L_R\omega_y}{V} \right]$, $V_{LR} = \sqrt{V^2 + L_R^2\omega_y^2}$, $\omega = \frac{\omega_y L}{V_{LR}}$.

Текущие значения углов δ_v , δ_b определяются как результат интегрирования уравнений приводов рулей с учетом соответствующих законов управления.

Уравнения приводов рулей имеют следующий вид:

$$\dot{\delta}_v = f_1(u_v);$$

$$\dot{\delta}_b = f_2(u_b).$$

Здесь u_v , u_b – управляющие сигналы вертикального и бортовых рулей, соответственно,

$$f_1(u_v) = \begin{cases} u_v, & \text{если } |u_v| < 3^\circ/\text{с}; \\ 3\text{sign} u_v, & \text{если } |u_v| \geq 3^\circ/\text{с}; \end{cases}$$

$$f_2(u_b) = \begin{cases} u_b, & \text{если } |u_b| < 35^\circ/\text{с}; \\ 35 \operatorname{sign} u_b, & \text{если } |u_b| \geq 35^\circ/\text{с}. \end{cases}$$

На максимальные отклонения рулей наложены ограничения, обусловленные конструкцией судна:

$$\begin{aligned} |\delta_v|_{\max} &= 35^\circ, \\ |\delta_b|_{\max} &= 30^\circ. \end{aligned}$$

В соответствии с методикой, изложенной в предыдущем параграфе, осуществим линеаризацию приведенных уравнений в окрестности нулевого положения равновесия по координатам $V_z, \omega_x, \omega_y, \theta, \varphi$ при постоянной продольной составляющей $V_x = V$ скорости хода. В результате получим следующие уравнения линейной модели рассматриваемого судна как объекта управления:

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= -a_{11}VV_z + a_{12}\omega_x + a_{13}V\omega_y + a_{14}\theta - b_{11}V^2\delta_v - b_{12}V^2\delta_b + c_{11}F_z - c_{12}M_x; \\ \dot{\omega}_x &= a_{21}VV_z - a_{22}\omega_x - a_{23}V\omega_y - a_{24}\theta + b_{21}V^2\delta_v + b_{22}V^2\delta_b - c_{21}F_z + c_{22}M_x; \\ \dot{\omega}_y &= a_{31}VV_z - a_{33}V\omega_y - b_{31}V^2\delta_v + c_{33}M_y; \\ \dot{\theta} &= \omega_x; \\ \dot{\varphi} &= \omega_y. \end{aligned}$$

Приведем также величины числовых коэффициентов для этих уравнений:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= 8.3763 \cdot 10^{-3}; & a_{12} &= 0.049538; & a_{13} &= 1.6228; & a_{14} &= 0.085262 \\
b_{11} &= 1.7038 \cdot 10^{-3}; & b_{12} &= 1.5073 \cdot 10^{-4}; & c_{11} &= 1.3255 \cdot 10^{-3}; & c_{12} &= 1.6748 \cdot 10^{-5}; \\
a_{21} &= 1.4384 \cdot 10^{-3}; & a_{22} &= 0.25824; & a_{23} &= 0.075626; & a_{24} &= 0.44446; \\
b_{21} &= 3.6206 \cdot 10^{-4}; & b_{22} &= 7.8575 \cdot 10^{-4}; & c_{21} &= 1.6748 \cdot 10^{-5}; & c_{22} &= 8.7305 \cdot 10^{-5}; \\
a_{31} &= 2.5823 \cdot 10^{-4}; & a_{33} &= 0.052989; & b_{31} &= 2.4459 \cdot 10^{-4}; & c_{33} &= 1.5586 \cdot 10^{-6}.
\end{aligned}$$

1.2. Линеаризация системы

Обратимся к полной базовой математической модели МПО, представленной в предыдущем параграфе, которая была записана в векторно-матричной форме вида

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\delta}, \bar{\mathbf{f}}_{out}) \quad (1.4)$$

Выделим некоторое контролируемое движение МПО $\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}}_p(t)$, $\bar{\delta} = \bar{\delta}_p(t)$, $\bar{\mathbf{f}}_{out}(t) = \bar{\mathbf{f}}_p(t)$, определяемое заданными векторами-функциями, которые удовлетворяют системе уравнений (1.4). При этом обеспечивается выполнение тождества

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_p \equiv \mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}_p, \bar{\delta}_p, \bar{\mathbf{f}}_p). \quad (1.5)$$

В (1.5) обозначим через $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, $\delta = \delta(t)$, $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$ отклонения соответствующих переменных в (1.4) от указанного движения, определяя этим соотношения

$$\bar{\mathbf{x}}(t) = \bar{\mathbf{x}}_p(t) + \mathbf{x}(t), \quad \bar{\delta}(t) = \bar{\delta}_p(t) + \delta(t), \quad \bar{\mathbf{f}}_{out}(t) = \bar{\mathbf{f}}_p(t) + \mathbf{f}(t). \quad (1.6)$$

С учетом (1.6), запишем нелинейную систему, описывающую динамику МПО в отклонениях:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \delta, \mathbf{f}), \quad (1.7)$$

а также осуществим линеаризацию системы (1.5) или (1.7) в малой окрестности выбранного контролируемого движения. При этом получим систему линейных дифференциальных уравнений в отклонениях вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)\delta + \mathbf{C}_f(t)\mathbf{f}. \quad (1.8)$$

Как указано в работах В. И. Зубова, рассматриваемое контролируемое движение $\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}}_p(t)$, $\bar{\delta} = \bar{\delta}_p(t)$, $\bar{\mathbf{f}}_{out}(t) = \bar{\mathbf{f}}_p(t)$ можно сделать асимптотически устойчивым в смысле А. М. Ляпунова при условии $\mathbf{f}(t) \equiv 0$ с помощью обратных связей, если выполняются два следующих требования:

- 1) $\|\mathbf{G}(\mathbf{x}, \delta, 0) - \mathbf{A}(t)\mathbf{x} - \mathbf{B}(t)\delta\| \leq \theta(\|\mathbf{x}\| + \|\delta\|),$

где $\theta \rightarrow 0$ при $\|\mathbf{x}\| \rightarrow 0$ и $\|\delta\| \rightarrow 0$;

- 2) *неуправляемая часть линейного приближения (1.8) является устойчивой.*

В дальнейшем будем считать, что контролируемое движение таково, что матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} имеют постоянные компоненты. Непосредственным анализом полной математической модели МПО, представленной уравнениями (1.1) – (1.4), можно показать, что первое из приведенных требований всегда выполняется.

На основе получения вышеупомянутого набора динамических уравнений состояния движения судна, можно прогнозировать соответствующее движение с задающим управлением и оценить эффективность управление для задачи обхода препятствий.

Глава 2. Формирование алгоритмов управления движением МПО для обхода препятствий

В приведенной выше работе, анализируя физические характеристики корабля, мы получили надежное и простейшее математическое описание динамической модели управления движением корабля. В задачах формирования управления для обхода препятствий, прежде всего, необходимо получить информацию о месте положения судна и препятствия и динамических особенностей, на основе которых определяем необходимость и способ обхода. С помощью математической модели управления движением судна, прогнозируем маршруты судна под выбранными действиями управляющих органов в соответствующем будущем периоде времени.

На основе динамической модели управления движением судна, описанной выше нелинейным дифференциальным уравнением, можем получить динамическое движение судна в горизонтальной плоскости в соответствии с различными управлениями. Итак, можем легко получить набор прогнозируемых траекторий движение судна, представленных в виде кривых, соответственно с различными управлениями, в том же исходном положении.

При анализе набора полученных траекторий движения судна, можно найти оптимальные варианты из них, удовлетворяющие различным требованиям, и соответствующие управления. Например, при различных обстоятельствах можем найти подходящую траекторию,

удовлетворяющая данному порогу безопасности, либо минимальной затрате времени, либо минимальному потреблению энергии. Чаще всего, основное внимание уделяется не одному фактору, а комплексному компромиссу по нескольким факторам, чтобы получить оптимизированный вариант и соответствующий управление, который в некоторой степени удовлетворяет нескольким требованиям.

Прежде всего, при разработке алгоритма анализируем наиболее упрощенный вариант.

Основываясь на выявлении и анализе препятствий, обнаруженных в пределах определенного расстояния, координаты положения и характеристики движения препятствий получены путем сравнения с состоянием движения данного объекта. Идентификация объектов препятствий не проводится в этой работе. Считается, что достоверная информация о препятствиях получается через другие подсистемы, включая позиционное соотношение и относительную скорость препятствия и судна. Следует отметить, что для подвижных и неподвижных объектов в обработке не различаем, только отмечаем на разных скоростях, поскольку нам нужно сосредоточиться на позиционном соотношении и относительную скорость в подвижной системы координат, а не скорость и место положения в земной системы координат.

На основе наблюдаемой позиции и характеристик движения объектов препятствий получим динамическое позиционное отношение между данным МПО и объектами препятствий, и прогнозируем траектории движение объектов препятствий относительно к МПО, так как и время и место положения «аварийной ситуации». Аварийная

ситуация в данном случае определяется состоянием, когда расстояние между МПО и объектом препятствия стало минимальным в определённый период времени от момента схождения до момента после отхождения. Очевидно, что, соответственно изменяя скорость или угол курса МПО или оба, минимальное расстояние и время возникновения аварийной ситуации также будут соответственно изменяться. Поэтому, исходя из существующей динамической модели управления движением МПО, можем легко получить соотношение между изменениями скорости и угла курса и временем возникновения аварийной ситуации, и соответствующим минимальным расстоянием.

Выполняя вычисление для набора прерывистых скоростей и изменений угла курса, получим соответствующие аварийные ситуации, в которых включены время возникновения и минимальное расстояние в соответствующее время. Комплексный анализ этих результатов можем легко определить направление оптимизации изменения скорости и соответственно угла курса, которое оказывает наибольшее влияние на время возникновения аварийной ситуации и минимальное расстояние. Дальнейшая обработка в этом направлении оптимизации может привести к лучшим результатам.

В процессе оптимизации также можем провести анализ для затрат времени и энергопотребления в процессе управления для обхода препятствий. Следует учитывать, что процесс управления для обхода препятствий неизбежно приведет к увеличению времени плавания. Как регулирование скорости, так и потери скорости от изменения угла курса, приводят к потере кинетической энергии, что естественно приводит к дополнительным расходам топлива. Исходя из этих

соображений, можно поставить задачу об оптимизации потребления энергии с повышением безопасности судоходства.

Этот процесс может быть легко реализован в задаче оптимального программного управления для анализа целого ряда различных конкретных препятствий. В процессе упрощения описания алгоритма пока не анализируем внешнюю форму и размер объекта препятствия, поскольку описание границ препятствия возможно легко преобразовано в набор конечных точек для простых геометрических фигур. Для групп мелких препятствий можно сформировать эквивалентное крупномасштабное препятствие путем введения некоторых ограничений. Исследования в этой области уже имеют разработанные решения, поэтому здесь они не обсуждаются.

Основываясь на этом методе, анализируя состояние движения судна, можно обеспечить минимальную безопасную область, описываемую простой геометрической формой. При приближении к ряду состояний движения могут быть установлены соответствующие состояния движения и различные геометрические зоны безопасности.

В процессе фактического применения метода требуется простое наблюдение и сравнение, чтобы быстро получить программное управление движением для задачи обхода препятствий, тем самым значительно сократив объем вычислительных ресурсов компьютера на борту и получив хорошее эффективное решение. Например, когда в данном диапазоне наблюдаются объекты препятствий, само судно будет удалено от них после сравнения позиционной связи между различными заранее определенными диапазонами. Соответственно, область

минимальных диапазонов безопасности может быть изменена путем изменения или направления движения, или скорости.

Задача обхода препятствий решается таким образом, чтобы не проводить сложные повторные процессы вычисления, и не привлекать в рассмотрение объекты, не входящие в безопасную зону.

2.1. Способ вычисления минимальных расстояний

Согласно вышеприведенному описанию метода, мы получили несколько существенных моментов для разработки алгоритма управления движением МПО для обхода препятствий.

Для вычисления управления движения судна для обхода препятствий, прежде всего, следует получить определенные исходные данные, предоставляемых извне системы. К ним относятся скорость по курсу V_s и угол курса судна φ_s , скорость движения объекта препятствия V_p и направлении его движения φ_p , координаты местоположения МПО (x_s, y_s) , и координаты местоположения препятствия (x_p, y_p) .

Согласно исходным данным, можем получить относительное положение препятствия от МПО

$$P_{ot} = (x_{ot}, y_{ot}) = (x_p, y_p) - (x_s, y_s).$$

Относительные скорости $V_{sx}, V_{sy}, V_{px}, V_{py}$ нужно вычислить через их проекции на оси Ox и ось Oy по соотношениям:

$$\begin{cases} V_{sx} = V_s \cos(\varphi_s), \\ V_{sy} = V_s \sin(\varphi_s); \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{px} = V_p \cos(\varphi_p), \\ V_{py} = V_p \sin(\varphi_p). \end{cases}$$

Тогда относительная скорость МПО от препятствия в векторном виде представляется выражением

$$\mathbf{V}_{ot} = \mathbf{V}_s - \mathbf{V}_p = (V_{sx} - V_{px}, V_{sy} - V_{py}) = (V_{otx}, V_{oty}),$$

а её направление –

$$\varphi_{ot} = \arctan \frac{V_{oty}}{V_{otx}}.$$

Затем получим расстояние между местоположением объекта препятствия и линии, где находится нормальный вектор вектора скорости

$$d = D(\mathbf{P}_{ot}, \mathbf{V}_{ot}) = \frac{|\mathbf{P}_{ot} \cdot \mathbf{n}_{V_{ot}}|}{|\mathbf{n}_{V_{ot}}|} = |\mathbf{P}_{ot}| \cos\left(\left|\theta_p - \left(\varphi_{ot} + \frac{\pi}{2}\right)\right|\right),$$

где $\mathbf{n}_{V_{ot}}$ - единичный нормальный вектор вектора относительной скорости \mathbf{V}_{ot} , следовательно,

$$d = \frac{|\mathbf{P}_{ot} \cdot \mathbf{n}_{V_{ot}}|}{|\mathbf{n}_{V_{ot}}|} = x_{P_{ot}} \cdot x_{n_{V_{ot}}} + y_{P_{ot}} \cdot y_{n_{V_{ot}}}. \quad (2.1)$$

С помощью (2.1) можем получить набор минимальных расстояний, соответствующих разным скоростям и изменениям курса.

Исходя из этих результатов, можем легко определить региональные максимальные точки, то есть оптимальный выбор изменений скорости и соответственного угла курса, или получим

направление, в котором градиент текущей точки состояния является наибольшим, то есть оптимального направления для решения задачи обхода препятствий.

2.2. Реализация вычисления минимальных состояний в программной среде MATLAB

Для того чтобы реализовать упрощенный вариант вычисления минимального расстояния между объектом препятствия и МПО в его процессе движения в программной среде MATLAB, зададим три набора начальных значений для различных ситуаций.

таблица 2.

	V_s	V_p	φ_s	φ_p	P_s	P_p
Одно направление	10	5	0	0	(0,0)	(10,0)
Противоположное направление	5	5	0	180°	(0,0)	(10,0)
Вертикальное направление	5	5	0	90°	(0,0)	(10,10)

В процессе вычисления считаем, что текущая скорость как центр, возьмём по 10 значений скоростей с изменением 0.5м/с в сторону увеличения и убывания. Соответственно, считаем текущий угол курса как центр, возьмем по 10 углов в направления по часовой стрелке и против часовой стрелки с изменением 5°. Тогда в результате будем получить 121 значение минимального расстояния в процессе движения МПО, соответственно, по изменению скорости движения МПО и его угла курса.

Графическое представление результатов показано на рис. 2. Как показано на рисунке, зависимости минимального расстояния при аварийной ситуации от изменений скорости и угла курса не является линейной. При применении этого метода её можем легко получить с помощью нахождения локального максимума или вычисления градиент начальной точки. Матрица устанавливается для изменения минимальных расстояний, соответствующих различным изменениям скорости МПО и изменениям угла курса. Простое сравнение значений в матрице приводит к локальному максимальному значению минимального расстояния в процессе обхода препятствий. Увидим на рис. 2 в случае, когда скорость МПО и скорость в одном направлении при угле курса $\varphi_s = \pm 35^\circ$ и скорости $V_s = 3$ минимального расстояния в процессе обхода препятствий достигается к максимальному значению. Исходя применения этого простого процесса вычисления очень важно при проектировании всей возможных процессов управляющих воздействий движения для обхода препятствий.

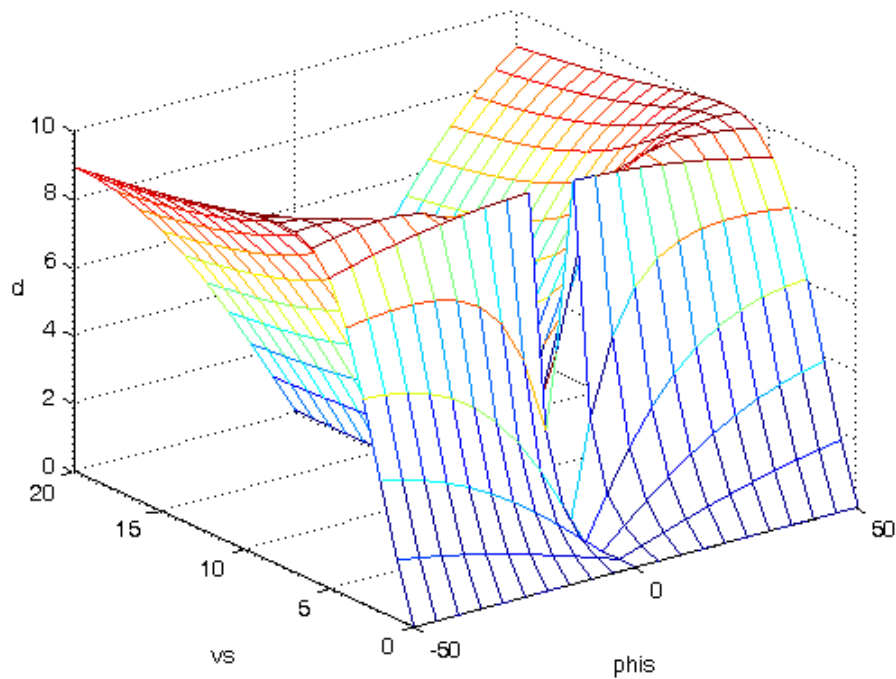


Рис. 2. Минимальные расстояния по одному направлению при изменении скорости и угла курса

На рис. 3 в случае, когда скорость МПО и скорость в противоположном направлении при угле курса $\varphi_s = \pm 35^\circ$ и скорости $V_s = -3$ минимального расстояния в процессе обхода препятствий достигается к максимальному значению. Но, в действительности, с учетом минимального безопасного расстояния МПО от объекта препятствий возможно не стоит принимать полученный результат, поскольку скорость снижается не столь сильно, т.е. можно избежать аварийной ситуации. В моделировании системы, как видно на предыдущем графике, стоит учитывать соответствующий порог для изменения минимального расстояния.

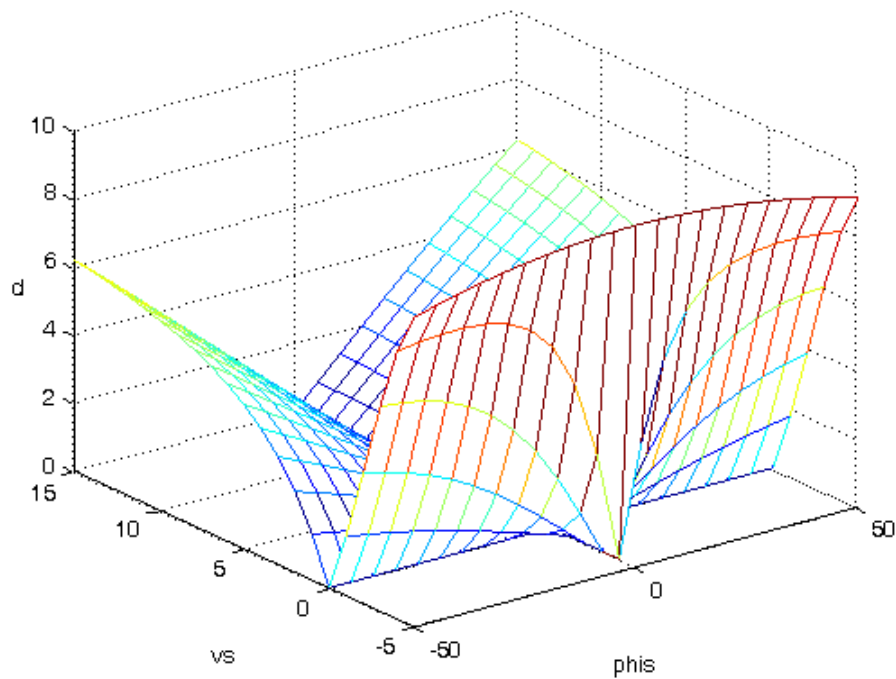


Рис. 3. Минимальные расстояния по противоположному направлению при изменении скорости и угла курса

На рис. 4 в случае, когда направления скорости МПО и скорости перпендикулярны при угле курса $\varphi_s = -35^\circ$ и скорости $V_s = 10$ минимальное расстояние в процессе обхода препятствий стремится к максимальному значению. Логично, что более безопасный вариант будет таким, что не следует обходить по ходу подвижного объекта препятствия, если его скорость достаточно высока.

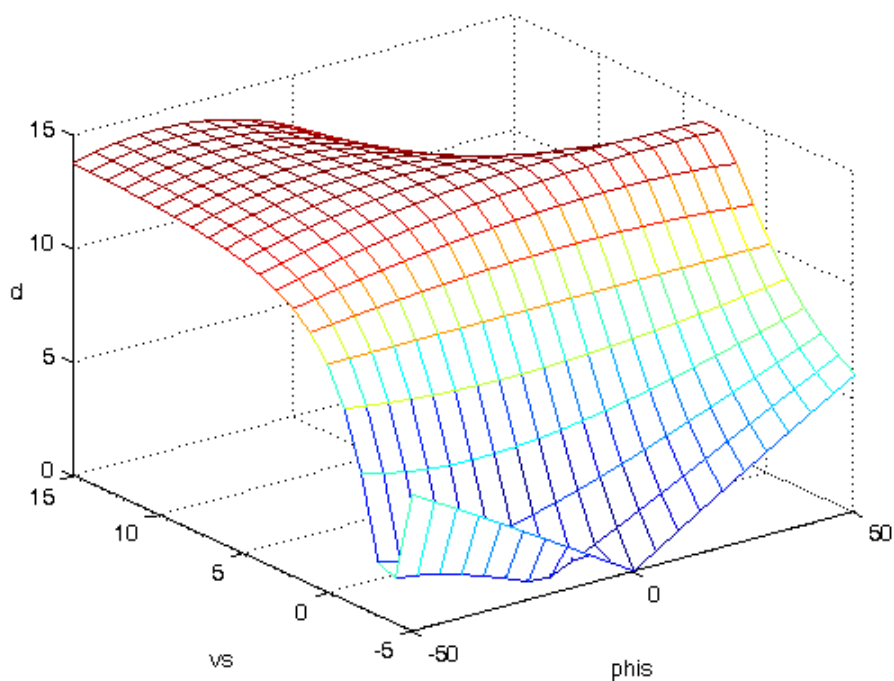


Рис. 4. Минимальные расстояния по вертикальному направлению при изменении скорости и угла курса

В проведенных экспериментах представлены три различные ситуации взаимодействия с препятствием, что позволяет быть уверенным в том, что в других ситуациях данный метод обеспечивает неплохой результатов для достижения поставленной цели.

Основываясь на соотношении между указанным выше минимальным расстоянием, скоростью и углом курса, мы получили решение о том, как найти максимальное увеличение минимального расстояния за счет минимального изменения скорости и угла поворота, чтобы добиться более эффективного обхода препятствий.

Однако в реальном процессе изменение скорости и угол поворота не являются независимым процессом, поскольку во время плавания

судна с изменением угла поворота влияния гидродинамической силы неизбежно приводят к потере скорости. Исследование вопроса как моделировать потери скорости плавания при повороте выяснило в своих работах Dacidson, Shiba, Li и др., Выполненный в глубоких исследованиях, также был в определенной степени близок к реальной ситуации прогноза. Среди этих моделей снижения скорости мы выбрали модель, которая была разработана для танкера OPALIA, и подгонки результат предсказания к измеренным данным в эксперименте достаточно высоко.

При проведении исследований было введено множество факторов, влияющих на поворот судна, и были выделены три важных фактора: циклический индекс, коэффициент нормальной силы на руль и изменение угла курса. Получено отношение между потерей скорости и этим тремя факторами. Описывается следующая формула

$$\frac{V}{V_0} = - 8.697 + 6.361K^2 + 7.960C_N - 5.295K^2 \cdot C_N - 0.226C_N \frac{\Delta\psi}{57.3} + 0.067(K)^2 + 0.028 \left[\frac{\Delta\psi^2}{57.3} \right]$$

Посредством вычисления и анализа величин потери скорости при повороте получены прогнозы потери скорости в движении судна. Было проведено сравнение соответствующих данных, полученных в реальном эксперименте, по движению судна в ходе процесса. Погрешность прогноза потери скорости составляет не минимум 0,3%. И максимум 14,1% [7].

С использованием модели потери скорости при вращении получим улучшенные результаты, представленные на рис. 5-7.

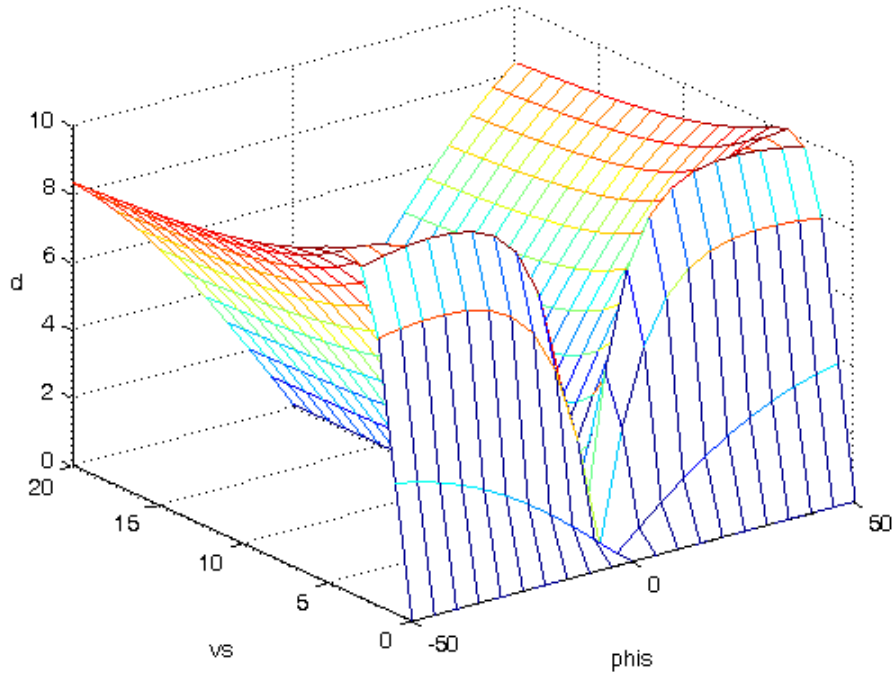


Рис. 5. Минимальные расстояния по одному направлению с учетом потери скорости при повороте

На рис. 5 показано что, при $V_s = 3$, $\varphi_s = \pm 35^\circ$ получим максимальное значение минимального расстояния в аварийной ситуации.

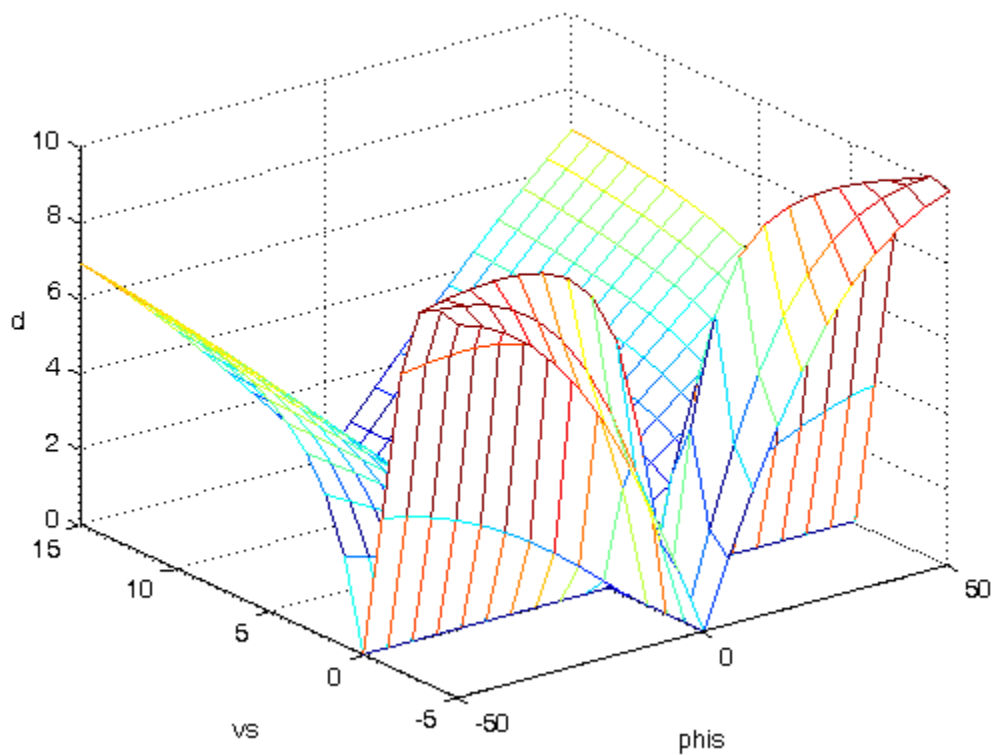


Рис. 6. Минимальные расстояния по противоположному направлению с учетом потери скорости при повороте

На рис. 6 показано что, при $V_s = -3$, $\varphi_s = \pm 35^\circ$ получим максимальное значение минимального расстояния в аварийной ситуации.

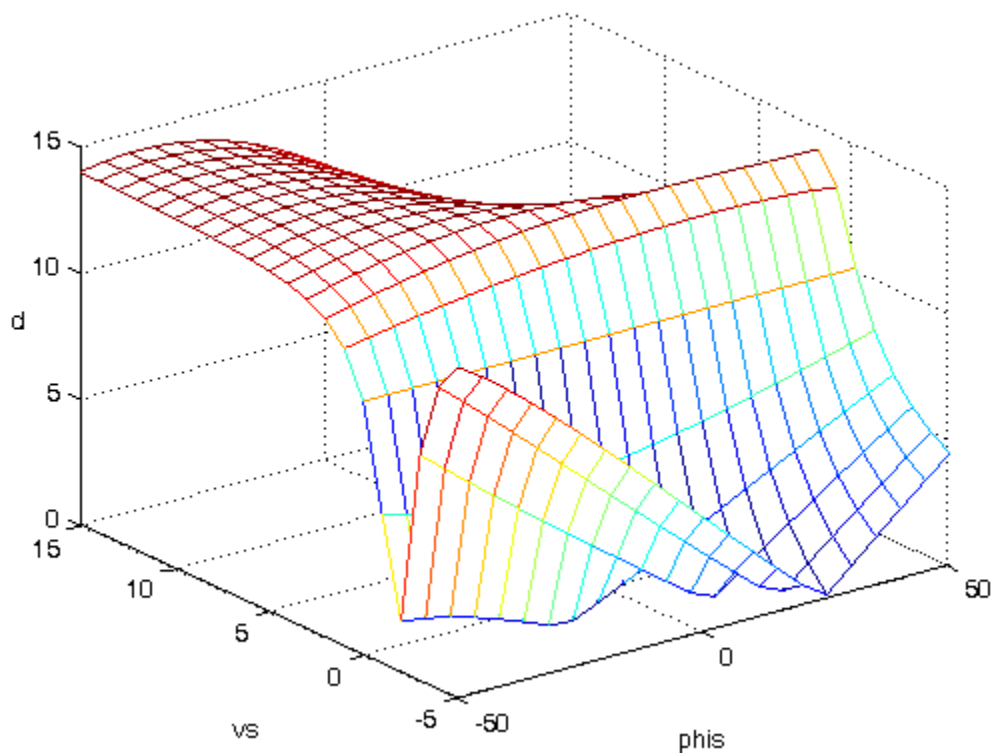


Рис. 7. Минимальные расстояния по вертикальному направлению с учетом потери скорости при повороте

На рис. 6 показано что, при $V_s = 10$, $\varphi_s = -35^\circ$ получим максимальное значение минимального расстояния в аварийной ситуации.

2.3. Реализация компьютерной модели в среде Simulink

В рамках данного раздела, в отличие от раздела 2, будем рассматривать систему автоматического управления МПО с использованием модели оценки эффективности обхода препятствий при

изменении скорости МПО и его угла курса с учетом потери скорости в движении поворота МПО.

В качестве примера построения системы автоматического управления, рассмотрим вопрос об автоматическом управлении курсом МПО, уравнения динамики которого приведены в работе [1].

Входным воздействием на МПО, рассматриваемый как объект управления, является управляющие силы и моменты. В данной работе для простоты принимается, что выходной сигнал совпадает с полным вектором состояния, хотя несложно перейти и к произвольному составу измеряемых переменных (рис. 8.).

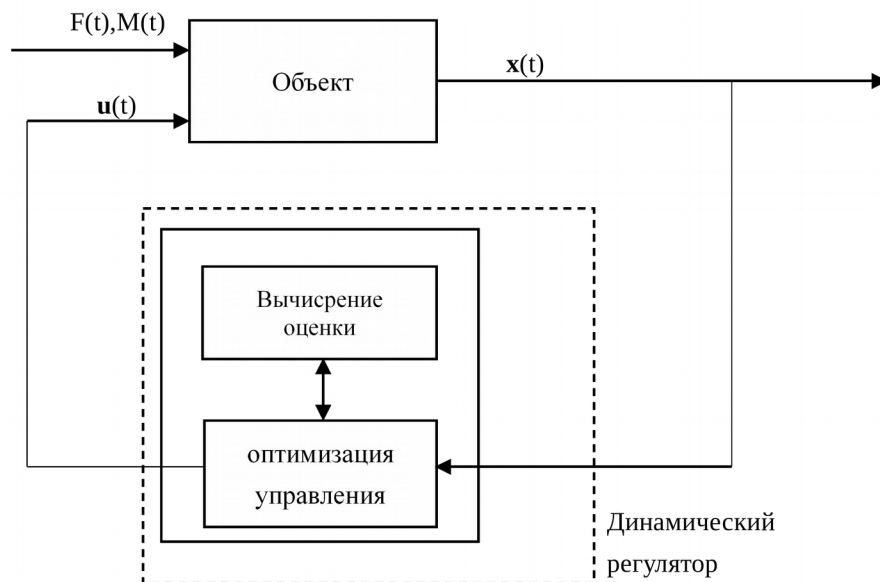


Рис. 8. Блок-схема системы управления.

Для формирования компьютерной модели воспользуемся инструментальной системой Simulink в среде MATLAB. Схема компьютерной модели приведена на рис. 9.

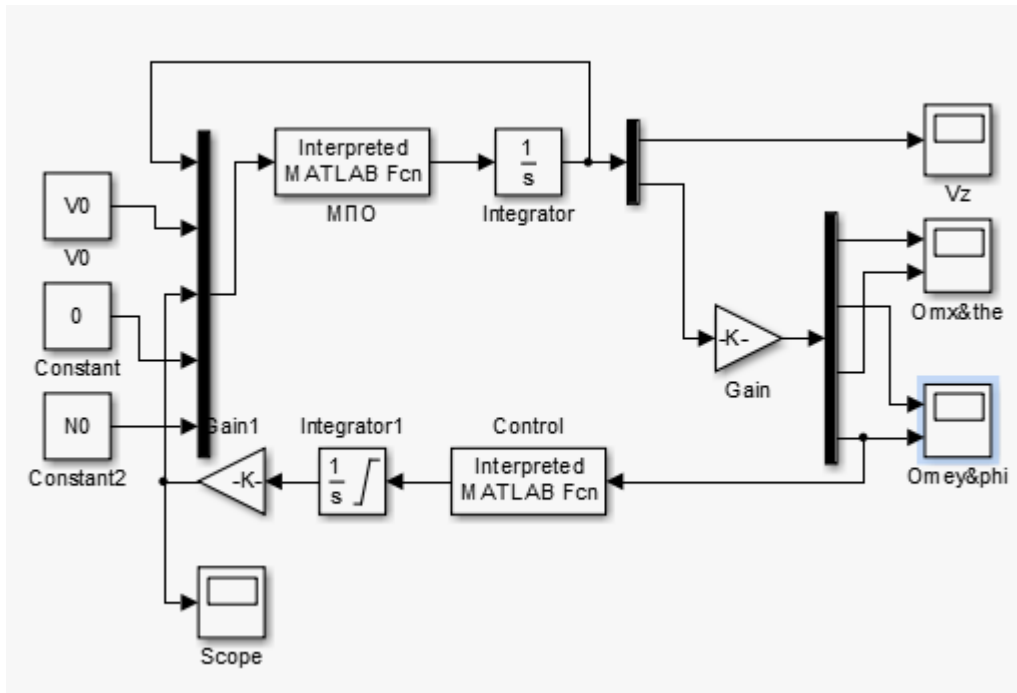


Рис. 9. Simulink-модель замкнутой системы управления курсом.

Рассмотрим Simulink-модель системы управления движением судна. Блок «МПО» моделирует МПО как динамический объект управления, определенной постоянными матрицами A, B, C , которые указаны в главе 1.

Эта система выдает выходной сигнал, в состав которого включены вектор состояния объекта. Входной сигнал объекта состоит из двух частей: сигнала управления и сигнала внешнего воздействия. С использованием данной модели в ходе имитационного моделирования можно проверить, способна ли система управления для задачи обхода препятствий. Блок «Control» формирует сигнал управления с

использованием модели оценки эффективности обхода препятствий при изменении скорости МПО и его угла курса с учетом потери скорости в движении поворота МПО. Остальные блоки на приведенной схеме осуществляют приведение углов к одинаковым единицам измерения, а также выполняют отображение графиков изменения динамических переменных в процессе имитационного моделирования.

2.4. Исследования с помощью компьютерной модели

Для построения компьютерной модели системы управления с реализацией метода оценки эффективности обхода препятствий при изменении скорости МПО и его угла курса с учетом потери скорости в движении поворота МПО, необходимо задать значения нескольких важных параметров, которые зависят от конкретной решаемой задачи. Заметим, что эти параметры нельзя найти аналитически – их можно получить только практическим путем на основе экспериментов. В качестве тестового режима будем рассматривать случай, когда скорости МПО и объект препятствий противоположены.

Проведем эксперимент для проверки функционирования предложенного метода в процессе обхода препятствия. Зададим следующие начальные условия: скорость хода $V_s = 5 \text{ м/с}$ и векторное состояние $X_s = \mathbf{0}$ (в том числе и угол курса $\varphi_s = 0$). Соответственно скорость хода для объекта-препятствия $V_p = -5 \text{ м/с}$, направление скорости $\varphi_p = 180^\circ$. Будем считать, что в начальный момент объект препятствия имеет координаты $(0, 450)$ в полусвязанной системе. Очевидно, что в начальный момент минимальное расстояние между МПО и объектом-препятствием равно нулю. В результате применения метода получены динамика угла курса МПО и соответствующая

динамика угла отклонения руля с ограничением максимальной угловой скорости отклонения руля $u_{\max} = \pm 3^\circ / c$ и максимального угла отклонения руля $\delta_{\max} = \pm 35^\circ / c$, что изображено на рис. 10 и 11.

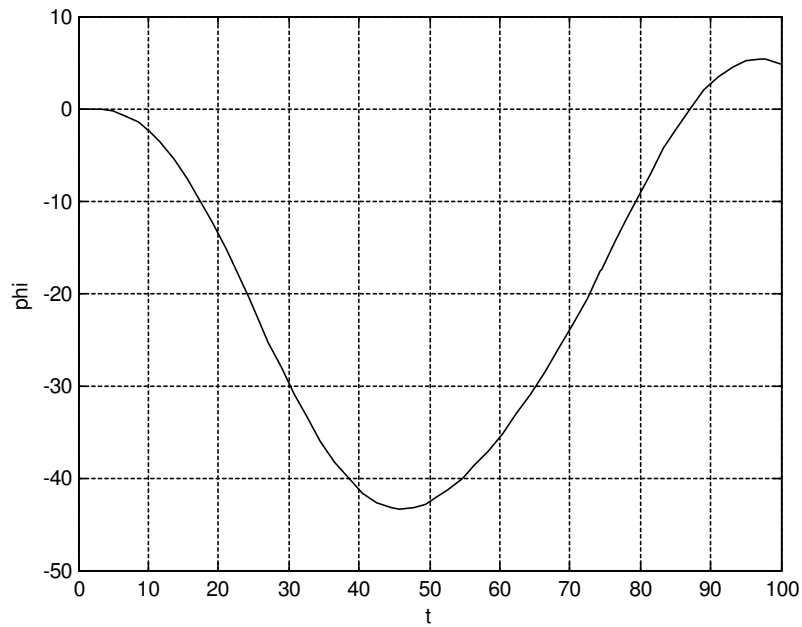


Рис. 10. Динамика угла курса в процессе обхода препятствий.

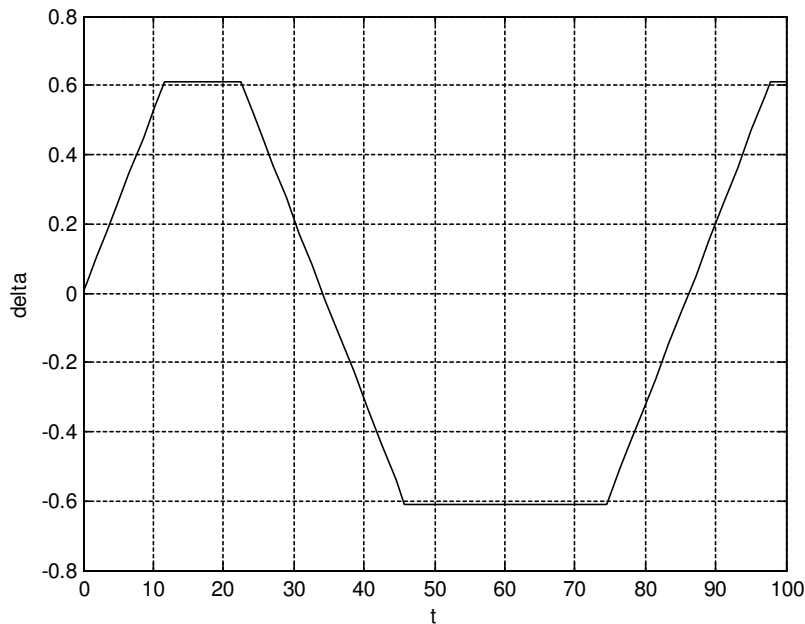


Рис. 11. Динамика угла отклонения руля в процессе обхода препятствий.

Из анализа рис. 10. и рис 11. видно, что с отклонением руля МПО начинает поворачивать по направлению против часовой стрелки и руль отклоняется, соответственно, по часовой стрелке с максимальной угловой скоростью. С увеличением минимального расстояния, руль начинает двигаться в обратную сторону. При этом курс МПО возвращается к начальному состоянию. Так что с использованием данного метода задача обхода препятствия решается достаточно эффективно.

Выводы

В данной работе рассмотрена задача построения управления движением МПО для обхода препятствий. Предложены алгоритмы его построения, и их применение для реальной ситуации с учетом потери скорости при изменении курса МПО, с использованием нелинейной модели потери скорости от поворота. Показана эффективность метода обхода препятствий при изменении скорости МПО и его угла курса с учетом потери скорости в движении поворота МПО с помощью нахождения локального минимума. Экспериментально проверено качество управления для решения данной задачи. Учтен ограниченный вычислительный ресурс при бортовой реализации и учтены ограничения на угол крена в процессе поворота.

В результате проведения экспериментов можно сделать три вывода: методы обхода препятствий при совокупно изменении скорости МПО и его угла курса с помощью нахождения локального минимума обеспечивает оптимальный вариант для улучшения управления в задаче обхода препятствий, несмотря на достаточную простоту метода. С учетом потери скорости в повороте МПО определяется не только вариант оптимального управления, но и улучшается прогноза движения МПО при выбранном управлении.

Система управления, основанная на данном методе, действительно справляется с предотвращением аварийной ситуации. При этом требование к ресурсам минимальное. Метод простой, адаптивность и эффективность достаточно высокие. И, самое главное, его применение удобно и гибко при выборе различных порогов.

Например, его использование позволяет заранее подготовить наборы программных управлений, которые соответствуют определёнными безопасными диапазонами в виде геометрических фигур для упрощения процессов вычисления в аварийной ситуации.

Заключение

В итоге проведенных исследований по теме выпускной квалификационной работы получены следующие результаты:

1. Сформирована математическая модель, описывающая динамику движения на горизонтальной плоскости МПО, и разработан компьютерный моделирующий комплекс для решения задач анализа и синтеза законов оптимального автоматического управления движением МПО к цели обхода препятствий.

2. В качестве базового метода построения управлений принята оптимизация процессов обхода препятствий с учетом существенных влияющих факторов, проведен выбор весовых коэффициентов для достижения оптимальной настройки, найдены управления и проведен анализ динамики соответствующих систем.

3. Рассмотрены вопросы практического синтеза с использованием модели нелинейной потери скорости при движении конкретного МПО.

4. Состоятельность и эффективность принятого подхода подтверждена результатами компьютерного моделирования замкнутой системы.

Список использованной литературы

1. Войткунский Я. Я., Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение. 1982.– 288 с.
2. Веремей Е.И., Корчанов В.М., Коровкин М.В., Погожев С.В. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. 370 с.
3. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами.– СПб.: Элмор, 1996.– 320 с.
4. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов: Учебник. – СПб.: Элмор, 2002.– 360 с.
5. Дмитриев С. П., Пелевин А. Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2002.– 160 с.
6. Li Z., Zhang X., Jia Y., Исследования по снижению скорости в процессе движения судна, Технология навигации. 2008. Vol 3. С. 3–4.
7. Davidson K.S.M. On the turning and steering of ship. Trans. os SNAME, 1944. 38 с.
8. Shiba H. Model experiments about the maneuverability and turning of ships. DTMB Report, 1960. 1461 с.
9. Chang K. Y., Jan G. E., Parberry I.. A method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts. The Journal of Navigation, 2003, 56, С. 371-384.

10. Gen H., Проблемы о создании буферов на основе системы ГИС. Журнал Уханьского технического университета по геодезии и картографии. 2005, vol. 5, С 33.
11. Tang Q. Алгоритм оптимизации маршрута на основе электронных диаграмм . China Navigation, 2010, vol 4, С 33.

ПРИЛОЖЕНИЕ

```
optOB.m
%speed ship1 & ship2 (vel, ang)
%ship1(0,0) & ship2(5,6)
%minRec(vt, vp, phit*pi/180, phip*pi/180, Ps, Pp);
%по одному направлению
vs = 10;
vp = 5;
phis = 0;
phip = 0;
Ps = [0 0];
Pp = [400 0];

%по противоположному направлению
% vs = 10;
% vp = 5;
% phis = 0;
% phip = 180;
% Ps = [0 0];
% Pp = [10 0];
%
%по вертикальному направлению
% vs = 5;
% vp = 5;
% phis = 0;
% phip = 180;
% Ps = [0 0];
% Pp = [10 0];

dT = 20; %количество отрезков
dvVol = 1; %изменение скорости
dphVol = 5; %изменение угла курса
K = 1.3966; %
CN = 1.2574;

DD = zeros(dT + 1, dT + 1);%
DD1 = zeros(dT + 1, dT + 1);%
```

```

v0 = vs - (dvVol*dT/2); %
phi0 = phis - (dphVol*dT/2); %
vt = v0;
phit = phi0;

for i = 1:dT+1
    vt = v0 + dvVol*(i-1);
    vt1 = vt*(-8.697 + 6.361*K + 7.960*CN...
        - 5.295*K*CN - 0.226*CN*(abs(phit - phis))/57.3...
        + 0.067*K^2 + 0.028*(abs(phit - phis))^2/57.3);
    for j = 1:dT+1
        phit = phi0 + dphVol*(j-1)
        d = minRec(vt, vp, phit*pi/180, phip*pi/180, Ps, Pp)
        DD(i, j) = d;
        DD1(i, j) = minRec(vt1, vp, phit*pi/180, phip*pi/180, Ps, Pp);
    end
end

[maxDx, Ix] = max(DD)
[maxDy, Iy] = max(maxDx)
MC = [Ix(Iy) Iy]

xAx = [vs - (dvVol*dT/2):dvVol:vs + (dvVol*dT/2)];
yAx = [phis - (dphVol*dT/2):dphVol:phis + (dphVol*dT/2)];
figure(1)
mesh(yAx, xAx, DD)
title('');
x1=xlabel('vs');
x2=ylabel('phis');
x3=zlabel('d');
set(x1, 'Rotation', 0);
set(x2, 'Rotation', 0);
set(x3, 'Rotation', 0);

figure(2)
mesh(yAx, xAx, DD1)

MCv = [xAx(MC(1)) yAx(MC(2))]

//-----

function [OP] = minRec(vs, vp, phis, phip, Ps, Pp)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Vs = [vs*cos(phis); vs*sin(phis)];
Vp = [vp*cos(phip); vp*sin(phip)];
Vot = [Vs(1)-Vp(1); Vs(2)-Vp(2)];
Pot = [Pp(1)-Ps(1); Pp(2)-Ps(2)];
% phiot = atan2(Vot(2),Vot(1));
% thetPot = atan2(Pot(2),Pot(1));
n = [-Vot(2)/norm(Vot) Vot(1)/norm(Vot)];
d = dot(Pot, n);
OP = abs(d);
end

% V %скорость хода
% Vz % боковая скорость

```

```

% omega_x % угловая скорость крена
% omega_y %угловой скорость курса
% thet %угол крена
% phi %угол курса
V0 = 5;
x0 = [0;0;0.5*pi/180;0;0]
delta0 = [0;0];
N0 = [0;0;0];

function [ dx ] = ObjMpo( Input )
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
V = Input(6);
%x = [Vz omega_x omega_y thet phi]
x = Input(1:5);
delta = Input(7:8);
N = Input(9:11);

x=x.*[V 1 V 1 1]';
delta = delta.*[V^2;V^2];

% компонент вектора состояния
% V %скорость хода
% Vz %боковая скорость
% omega_x %угловая скорость крена
% omega_y %угловая скорость курса
% thet %угол крена
% phi %угол курса
% delta_v %угол отклонения вертикального руля
% uv %угловая скорость отклонения вертикального руля
% delta_b %угол отклонения горизонтального руля
% ub % угловая скорость отклонения горизонтального руля
% Fz %внешние силы;
% Mz %внешние моменты
% My %

a11 = 8.3763*10^-3; a12 = 4.9538*10^-2; a13 = 1.6228; a14 = 8.5262*10^-2;
b11 = 1.7038*10^-3; b12 = 1.5073*10^-4; c11 = 1.3255*10^-3; c12 = 1.6748*10^-5;
a21 = 1.4384*10^-3; a22 = 0.25824; a23 = 7.5626*10^-2; a24 = 0.4446;
b21 = 3.6206*10^-4; b22 = 7.8575*10^-4; c21 = 1.6748*10^-5; c22 = 8.7305*10^-5;
a31 = 2.5823*10^-4; a33 = 5.2989*10^-2; b31 = 2.4459*10^-4; c33 = 1.5586*10^-6;

A = [-a11 a12 a13 a14 0;
      a21 -a22 -a23 -a24 0;
      a31 0 -a33 0 0;
      0 1 0 0 0;
      0 0 1 0 0];
b = [-b11 -b12;
      b21 b22;
      -b31 0;
      0 0;
      0 0];

```



```

c = [c11 -c12 0;
     -c21 c22 0;
     0 0 c33;
     0 0 0;
     0 0 0];

dx = A*x + b*delta + c*N;

end

startMPO

global v0
v0 = 5;
x0 = [0;0;0*pi/180;0;0]
delta0 = [0;0];
N0 = [0;0;0];

function [Output] = bcon( Input )
%UNTITLED5 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
global v0
phiN = Input;
vs = 5;
vp = -5;
phis = 0;
phip = 180;
Ps = [0 0];
Pp = [10 0];

dT = 20; %
dvVol = 1; %
dphVol = 5;
K = 1.3966;
CN = 1.2574;

DD = zeros(dT + 1, dT + 1);
DD1 = zeros(dT + 1, dT + 1);
v0 = vs - (dvVol*dT/2);
phi0 = phis - (dphVol*dT/2);
vt = v0;
phit = phi0;

for i = 1:dT+1
    vt = v0 + dvVol*(i-1);
    vt1 = vt*(-8.697 + 6.361*K + 7.960*CN...
            - 5.295*K*CN - 0.226*CN*(abs(phit - phis))/57.3...
            + 0.067*K^2 + 0.028*(abs(phit - phis))^2/57.3);
    for j = 1:dT+1
        phit = phi0 + dphVol*(j-1);
        % d = minRec(vt, vp, phit*pi/180, phip*pi/180, Ps, Pp);
        % DD(i, j) = d;
        d = minRec(vt1, vp, phit*pi/180, phip*pi/180, Ps, Pp);
        DD1(i, j) = d;
    end
end

```

```

end
xAx = [vs - (dvVol*dT/2):dvVol:vs + (dvVol*dT/2)];
yAx = [phis - (dphVol*dT/2):dphVol:phis + (dphVol*dT/2)];
[maxDx, Ix] = max(DD1);
[maxDy, Iy] = max(maxDx);
MC = [Ix(Iy) Iy];
MCv = [xAx(MC(1)) yAx(MC(2))];
V0 = MCv(1);

Output = MCv(2);

if phiN > MCv(2)/2
    Output = 3*pi/180;
else
    Output = -3*pi/180;
end

```