

STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM OF A MARINE VESSEL IN DYNAMIC POSITIONING MODE AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION

I. M. Movchan, D. A. Oskin

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

Currently, dynamic positioning and low-speed maneuvering systems are increasingly in demand and necessary for safe maritime activities. Dynamic positioning systems are widely used mainly in the oil and gas industry, but also in supply vessels, barges and drilling rigs, ocean liners, and cargo ships. The development and analysis of control systems for the effective operation of a ship's control system with dynamic positioning requires the use of a mathematical model of the vessel, on the basis of which a study of synthesized control systems is carried out. The article proposes a general structure for modeling the control system for a vessel with dynamic positioning. The control system is represented by a set of a control object (in our case, a marine vessel), a command input device, a control device (controller), and an information and measuring system. The article considers a mathematical model of plane-parallel motion of a vessel, describing the movement of a vessel in three generalized coordinates: surge, sway, and yaw. As an example, two types of vessels with different propulsion systems are considered: a vessel equipped with two aft azimuth thrusters and a bow tunnel thruster, and a similar vessel, but equipped with a bow azimuth thruster. The forces generated by the propulsion devices of ships are determined through the connection with generalized forces and moments via the thrust allocation matrix for the corresponding kinematic scheme. The given propulsion schemes provide the possibility of holding the vessel in dynamic positioning mode. The description of mathematical models is presented in the form of vector-matrix nonlinear differential equations. The mathematical apparatus used to represent mathematical models of ships allows the use of models for the synthesis and modeling of control systems. The structure of the software implementation of the control system, developed in the Matlab environment, a description of the developed modules, and simulation results are presented.

Keywords: marine vessel, control system, dynamic positioning, low-speed maneuvering, mathematical model, plane-parallel motion, PID control.

For citation:

Movchan, Ivan M. and D. A. Oskin "Structure of the control system of a marine vessel in dynamic positioning mode and its software implementation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 49–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-49-60.

УДК: 656.61, 519.876.2

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ СУДНОМ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

И. М. Мовчан, Д. А. Оськин

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования являются все более востребованные в настоящее время для безопасной морской деятельности системы динамического позиционирования и низкоскоростного маневрирования. Отмечается, что широкое применение системы динамического позиционирования находят не только в нефтегазовой промышленности, но также и на судах снабжения, баржах и буровых установках, океанских лайнерах и грузовых судах. Разработка и анализ систем управления для эффективной работы системы управления судном с динамическим позиционированием требует использования его математической модели, на основе которой производится исследование синтезированных систем управления. В статье предлагается для моделирования общая структура системы управления судна с динамическим позиционированием. Система управления представлена совокупностью объекта управления (в данном случае морского судна), задающего устройства, устройства управления (контроллера), а также информационно-измерительной системы.

В статье рассмотрена математическая модель плоскопараллельного движения судна, описывающая движение судна в трех обобщенных координатах: поступательное продольное движение, боковой снос и рыскание. В качестве примера рассмотрены два типа судов с различными движительными системами: суда, оснащенные двумя кормовыми азимутальными винторулевыми колонками и носовым туннельным подруливающим устройством, и аналогичные суда, оборудованные носовой винторулевой колонкой. Упоры, формируемые движительными устройствами судов, определяются посредством связи с обобщенными силами и моментами через матрицу тяги для соответствующей кинематической схемы. Приведенные движительные схемы обеспечивают возможность удержания судна в режиме динамического позиционирования. Описание математических моделей представлено в виде векторно-матричных нелинейных дифференциальных уравнений. Используемый для представления математических моделей судов математический аппарат позволяет использовать модели для синтеза и моделирования систем управления. Приведены структура программной реализации системы управления, выполненная в среде Matlab, описание разработанных модулей и результаты моделирования.

Ключевые слова: морское судно, система управления, динамическое позиционирование, низкоскоростное маневрирование, математическая модель, плоскопараллельное движение, ПИД-регулирование.

Для цитирования:

Мовчан И. М. Структура системы управления морским судном в режиме динамического позиционирования и ее программная реализация / И. М. Мовчан, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 17. — № 1. — С. 49–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-49-60. — EDN IHGRVG.

Введение (Introduction)

В настоящее время системы динамического позиционирования (ДП) и низкоскоростного маневрирования являются все более востребованными и необходимыми для безопасной морской деятельности. Динамическое позиционирование как процесс управления исследуется и разрабатывается начиная с 70-х гг. XX в. При этом основное внимание уделяется крупным судам, таким как суда снабжения, баржи и буровые установки, океанские лайнеры и грузовые суда в основном для нефтегазовой промышленности. Данная технология позволяет судну в автоматическом режиме удерживать заданный локационный режим без привязки к якорю или внешним воздействиям, что делает ее особенно актуальной в условиях ограниченных маневровых пространств и нестабильных погодных условий.

Суда с возможностями динамического позиционирования пользуются большим спросом как из-за их гибкости, так и из-за хорошей способности сохранять свое местоположение с высокой точностью. Подобные системы применимы также и для маломерных судов и могут быть полезными для улучшения качества управления судами. В условиях увеличения эксплуатационных расходов важно, чтобы суда на месте могли выполнять операции также в более суровых условиях окружающей среды, тем самым максимально увеличивая время эксплуатации [1], [2].

Предметом исследования является программная реализация модели системы управления судном, оснащенным системой динамического позиционирования. В настоящей работе использована математическая модель плоскопараллельного движения судна, управляемого различными движительными системами. Система управления программно реализована в виде ПИД-регулятора. Разработка предназначена для моделирования управляемого движения судна в режиме низкоскоростного маневрирования и динамического позиционирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе [1] отмечается, что система ДП представляет многоконтурную систему управления активными средствами управления (движительным комплексом), обеспечивающую заданное положение судна или его перемещение по выбранной траектории при действии внешних сил, сочетающую три комплекса устройств: измерительного, информационно-командного и движительно-рулевого.

Для моделирования системы ДП рассмотрим структуру, представленную на рис. 1. Предложенная структурная схема представляет собой совокупность объекта управления (в данном

случае морского судна (МС)), оснащенного движительным комплексом, и элементов системы управления: задающего устройства, устройства управления (контроллера), информационно-измерительной системы.

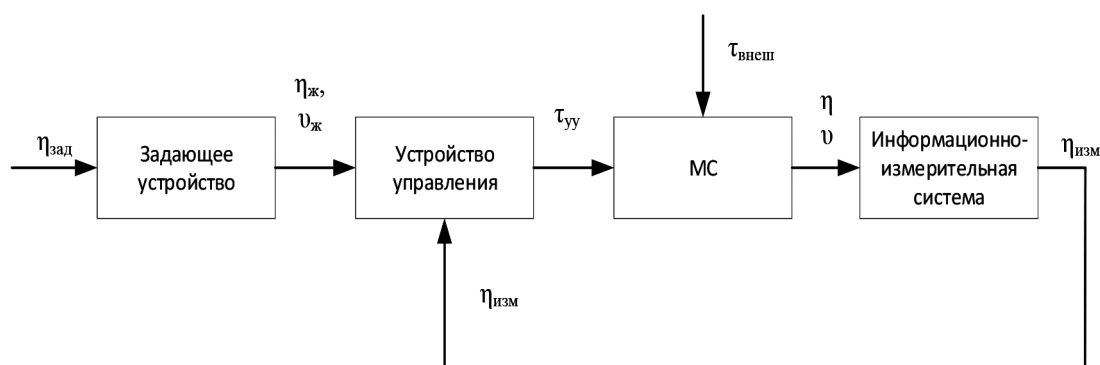


Рис. 1. Структурная схема системы управления судном с системой динамического позиционирования

Модель маневрирования судна в режиме трех степеней свободы. При решении задач навигации, ориентации и управления морскими судами используются разные системы координат. На рис. 2, а приведена так называемая *промежуточная земная, или полусвязная система координат* $Ox_g y_g z_g$, характеризующаяся тем, что ее начало совмещено с центром масс и перемещается с ним в пространстве. Оси ориентированы таким образом, что ось Ox_g ориентирована на север. В математических моделях судов также используется подвижная система координат, полностью связанная с его корпусом и перемещающаяся вместе с ним.

Начало координатных осей обычно располагается в центре инерции аппарата, а оси совпадают с главными центральными осями инерции. В рассматриваемом случае подвижная система координат $Oxyz$ привязана к центру масс судна. Координатная ось Ox всегда направлена по ходу движения судна, т. е. повернута в горизонтальной плоскости на угол заданного курса судна (рис. 2, б).

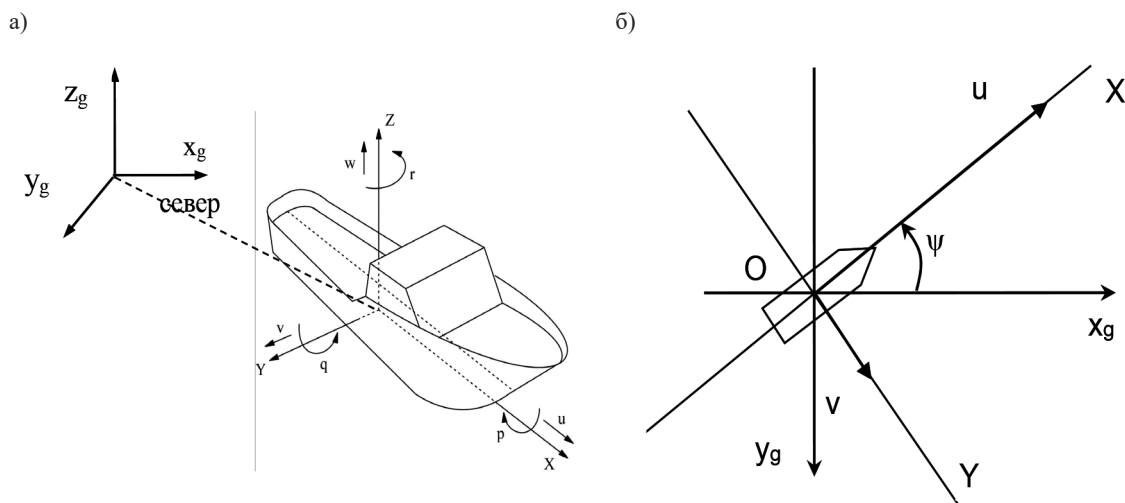


Рис. 2. Модели судна: а — трехмерная модель судна и системы координат (общий вид); б — модель движения судна в горизонтальной плоскости (вид сверху)

Полная модель маневрирования судна содержит дифференциальные уравнения движения в шести степенях свободы, обозначаемых как продольное движение, боковой снос и вертикальная качка для определения положения судна, а также крен, дифферент и рыскание для определения ориентации судна (табл. 1).

Таблица 1

Обозначения, используемые для кинематических моделей морского судна

Описание движения	Координаты и углы Эйлера		Линейные и угловые скорости	
Продольное движение (вдоль оси Ox)	x	η_1	u	v_1
Боковой снос (вдоль оси Oy)	y		v	
Вертикальная качка (вдоль оси Oz)	z		w	
Крен (вращение вокруг оси Ox)	φ	η_2	p	v_2
Дифферент (вращение вокруг оси Oy)	θ		q	
Рыскание (вращение вокруг оси Oz)	ψ		r	

Вектора линейной и угловой скорости (v_1, v_2) относительно системы координат $Oxyz$ могут быть преобразованы, соответственно, в вектора линейной и угловой скорости в фиксированной системе отсчета $Ox_g y_g z_g$ ($\dot{\eta}_1, \dot{\eta}_2$):

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $R_1(\eta_1), R_2(\eta_2)$ — функции углов Эйлера.

Для определения динамических параметров экспериментального морского автономного или дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) воспользуемся упрощенными уравнениями, исходя из предположения, что движения судна ограничены только в горизонтальной плоскости, т. е. креном ($p = 0$) и дифферентом ($q = 0$) можно пренебречь. Перемещение, соответствующее вертикальной качке (вдоль оси Oz), пренебрежимо мало ($w = 0$). Таким образом, рассматриваемое движение судна является плоскопараллельным: поступательное движение вдоль оси Ox , боковой снос (вдоль оси Oy) и рыскание. Уравнения плоскопараллельного движения описывают поступательные движения (вдоль оси OE), рыскание (вращение вокруг оси Oz) и боковой снос (вдоль оси Oy):

$$\eta = [x \ y \ \psi]^T, \quad v = [u \ v \ r]^T.$$

В [3] выполнен обзор и анализ математических моделей движения судов, управляемых с помощью одной или двух винторулевых колонок, и основные задачи, решаемые с помощью данных моделей. При этом для решения задачи ДП такой кинематической схемы не всегда достаточно, поэтому далее рассмотрены математические модели судов, обладающих также носовыми управляющими устройствами.

В ряде работ [4]–[7] приведено описание математической модели судна в виде следующих соотношений:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\eta)v; \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_{yy} + \tau_{вн}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tau_{yy} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — матрица управляющих сил и моментов;

$\tau_{yy} = [F_x \ F_y \ M_z]^T$, $\tau_{вн} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — матрица внешних воздействий;

$R(\eta)$ — матрица вращения относительно оси Oz .

Матрица вращения относительно оси Oz представлена в виде

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица инерции $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ представляет собой сумму матрицы инерции твердого тела M_{RB} и гидродинамической добавленной массы M_A :

$$M = M_{RB} + M_A, \quad (4)$$

$$\text{где } M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix}; M_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{r}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix}.$$

Матрица $C(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ состоит из кориолисовой и центробежной составляющих $C_{RB}(v)$, дополненной матрицей гидродинамических составляющих $C_A(v)$:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v), \quad (5)$$

$$\text{где } C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}; C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u \\ -Y_v v - Y_r r & X_u u & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица $D(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ состоит из демпфирующих сил, которые обычно моделируются как сумма постоянных D_L и некоторых зависящих от скорости составляющих $D(v)$:

$$D(v) = D_L + D(v), \quad (6)$$

$$\text{где } D_L = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{bmatrix}; D_n(v) = \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{v|v}|v| - Y_{r|v}|r| & -Y_{v|r}|v| - Y_{r|r}|r| \\ 0 & -N_{v|v}|v| - N_{r|v}|r| & -N_{v|r}|v| - N_{r|r}|r| \end{bmatrix}.$$

В приведенных соотношениях (4)–(6) приняты следующие условные обозначения: m — масса судна, x_G — расстояние от центра вращения (ЦВ) до центра тяжести (ЦТ), I_z — момент инерции относительно оси Oz ;

$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$ — гидродинамические коэффициенты присоединенных масс и инерции;

X_u, Y_v, Y_r, N_r — гидродинамические коэффициенты присоединенных масс кориолисовой и центробежной составляющих;

$X_{u|u}, Y_{v|v}, Y_{r|v}, Y_{v|r}, Y_{r|r}, N_{v|v}, N_{r|v}, N_{v|r}, N_{r|r}$ — коэффициенты демпфирования.

Как отмечается в работе [6], для судна, работающего на скорости, близкой к нулевой (в режиме низкоскоростного маневрирования), принимается допущение $D_n(v) \approx 0$. Таким образом, приведенные уравнения (2)–(6) представляют собой математическую модель МС для плоскопараллельного движения, предназначенную для описания управляемого движения судна в режиме ДП. Модель является многосвязной и нелинейной. Нелинейность обусловлена наличием нелинейных функциональных связей в слагаемом $C(v)v$.

Математическая модель объекта управления является основополагающим элементом синтеза и моделирования систем управления и может быть реализована в широко применяющихся системах, таких как Matlab, Scilab, Simintech и др. [8]–[10].

Задающее устройство (ЗУ) используется для формирования желаемых перемещений судна $\eta_{\text{ж}} = [x_{\text{ж}}(t) \ y_{\text{ж}}(t) \ \psi_{\text{ж}}(t)]^T$ по заданной траектории $\eta_{\text{зад}} = [x_{\text{зад}}(t) \ y_{\text{зад}}(t) \ \psi_{\text{зад}}(t)]^T$ следования судна. ЗУ рекомендуется выбирать в виде звена третьего порядка [4], входной величиной которого являются заданная траектория $\eta_{\text{зад}}$, выходными — желаемые скорости $\dot{v}_{\text{ж}}$ и ускорения $\ddot{v}_{\text{ж}}$. Параметры ЗУ выбираются исходя из ограничений, накладываемых на скорости и ускорения перемещения МС и изменение его ориентации.

Информационно-измерительная система представляет собой совокупность информационных датчиков и системы сбора и передачи информации [11]. Измеренные координаты судна $\eta_{\text{изм}} = [x_{\text{изм}}(t) \ y_{\text{изм}}(t) \ \psi_{\text{изм}}(t)]^T$ поступают в устройство управления, где сравниваются с желаемыми.

Назначением устройства управления (контроллера) является выработка управляющих воздействий τ на исполнительные устройства объекта управления, в данном случае морского судна. Система распределения рассчитанных силовомоментных воздействий распределяется по движительным устройствам таким образом, чтобы получить требуемое усилие управления. В работе рассмотрены два типа судов с различными кинематическими схемами расположения тяговых устройств. Первый тип судна представлен двумя кормовыми винторулевыми колонками и носовым подруливающим устройством, второй — оснащен носовой винторулевой колонкой.

Внешние воздействия $\tau_{\text{внеш}}$ представляют собой ветроволновые воздействия, действующие на судно, а также течение. Внешние воздействия реализуются в виде формирующего фильтра второго порядка с поступающим на вход случайным сигналом с заданными параметрами¹.

Наиболее распространенными приводами для судов, использующих вращающиеся гребные винты, являются:

- азимутальные движители, которые могут использоваться как для управления, так и для приведения в движение (могут поворачиваться на 360° и, следовательно, создавать тягу в любом направлении);
- туннельные подруливающие устройства, которые могут создавать поперечную тягу и обычно устанавливаются на носу и корме судна, где создают наибольший момент (в основном используются для обеспечения низкоскоростного маневрирования).

На рис. 3 приведены две наиболее распространенные конфигурации движительных систем:

- с двумя кормовыми и одной носовой азимутальной ВРК [6];
- с двумя кормовыми азимутальными ВРК и носовым туннельным подруливающим устройством (ПДУ) [7].

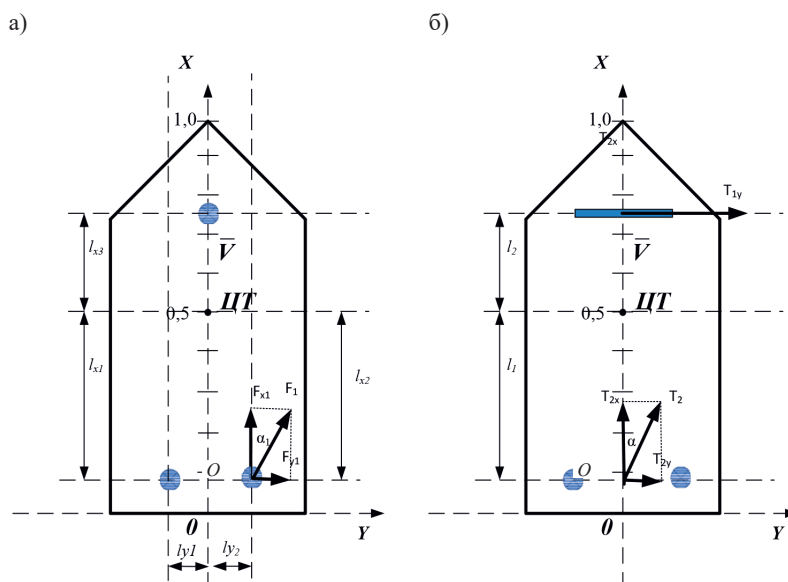


Рис. 3. Конфигурация движительных систем:

- α — три движителя — две кормовых и одна носовая ВРК (α_i — вектор угла поворота i -го движителя; F_i — вектор силы тяги i -го движителя; F_{xi} , F_{yi} — проекции вектора силы тяги i -го движителя в направлении осей Ox и Oy ; l_{xi} , l_{yi} — расстояние от центра тяжести (ЦТ) до i -го движителя в направлении осей Ox и Oy); б — две кормовых ВРК и носовое ПДУ (l_1 — расстояние от центра вращения (ЦТ) до туннельного двигателя ПДУ; l_2 — расстояние от ЦТ до двигателя ВРК; T_{2x} , T_{2y} — соответственно продольная и поперечная силы тяги ВРК; T_{1y} — поперечная сила тяги туннельного двигателя ПДУ; α — угол отклонения движителя ВРК относительно диаметральной плоскости судна

¹ Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.

Для определения сил и моментов, оказываемых движителями на судно $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, настраивается матрица конфигурации тяги. Для этого предполагается, что ЦТ известна и определена, а также известно положение каждого двигателя относительно этой точки. Силы и моменты, действующие на судно, теперь определяются в виде

$$\tau = T(\alpha)F. \quad (7)$$

Здесь $\alpha \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — вектор азимутальных углов;

$T(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ — матрица конфигурации двигателя малой тяги, где $F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ — усилие, создаваемое движителями.

Для системы с тремя степенями подвижности и геометрией движителей, представленной на рис. 3, а, размерности будут следующие: $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $U \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ и $T(\alpha) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Матрица конфигурации тяги для каждого двигателя записывается в виде

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} T(\alpha_1) & T(\alpha_2) & T(\alpha_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\alpha_1) & c(\alpha_2) & c(\alpha_3) \\ s(\alpha_1) & s(\alpha_2) & s(\alpha_3) \\ l_{x1}s(\alpha_1) & l_{y2}c(\alpha_2) - l_{x2}s(\alpha_2) & l_{y3}c(\alpha_3) - l_{x3}s(\alpha_3) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T$ — азимутальные углы;

$u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T$ — управляющие входные данные.

Конфигурация тяги судна выводится из сил и моментов из уравнений движения, определяемых в виде $\tau = [F_x \quad F_y \quad M_z]^T$.

Из рис. 3, б видно, что туннельный двигатель ПДУ обеспечивает силу поперечной тяги и угловой момент рыскания, а двигатель ВРК, в зависимости от его угла относительно диаметральной плоскости судна, обеспечивает силу продольной и поперечной тяги, а также угловой момент рыскания.

Угловой импульс рыскания является результатом произведения сил тяги T_{1y} и T_{2y} и соответствующих плеч l_1 и l_2 от центра вращения судна, как показано на рис. 3, б, откуда можно определить силы и моменты:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_2 \cos(\alpha) \\ f_1 \sin(\alpha) + f_1 \\ f_2 l_2 \sin(\alpha) + f_1 l_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} + T_{1y} \\ T_{2y} l_2 + T_{1y} l_1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Приведенные уравнения математической модели судна являются нелинейными, что затрудняет их использование для синтеза систем управления традиционными методами. Как правило, в системах динамического позиционирования используются пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы, методы настройки которых достаточно хорошо известны для линейных систем. Для нелинейных систем нахождение оптимальных коэффициентов ПИД-регуляторов затруднено, поэтому используются, как правило, упрощенные линеаризованные модели. Однако наряду с этим также используются методы адаптивного управления, позволяющие выполнять непрерывную подстройку параметров регуляторов для обеспечения качества управления.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности рассмотренной системы управления (см. рис. 1) в среде Matlab^{2,3} выполнена программная реализация в виде совокупности основных (табл. 2) и дополнительных модулей, реализующих вспомогательные функции.

² Андриевский Б. Р. Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab. СПб.: Наука, 2001. 286 с.

³ Ощепков А. Ю. Математическое и компьютерное моделирование современных систем автоматического управления: учеб. пособие [для вузов]. СПб.: Лань, 2024. 252 с.

Таблица 2

Описание основных модулей программной реализации

Модуль	Функциональное назначение
parameters.m	Модуль задания параметров. Предназначен для инициализации параметров модели системы управления: параметры матриц объекта управления, задающего устройства, движителей, контроллера, внешних воздействий. Используемые переменные описаны как глобальные для возможности использования во всех модулях.
odefun.m	Модуль правых частей дифференциальных уравнений. Предназначен для представления описания правых частей дифференциальных уравнений, описывающих систему управления. Используется как параметр решателя дифференциальных уравнений. Используемые переменные пространства состояний (в обозначениях в программном модуле): $q(1) — q(6)$ — уравнения объекта управления: $q(1) — q(3)$ — положения (x, y) и ориентация (ψ) МС; $q(4) — q(6)$ — скорости поступательного движения (u, v) и рыскания (r) МС; $q(7) — q(15)$ — уравнения задающего устройства: $q(7) — q(9)$ — желаемые положения (x_d, y_d) и ориентация (ψ_d); $q(10) — q(12)$ — желаемые скорости (u_j, v_j, r_j); $q(13) — q(15)$ — желаемые ускорения $(\dot{u}_j, \dot{v}_j, \dot{r}_j)$; $q(16) — q(18)$ — вспомогательные уравнения интегральной составляющей (для реализации ПИД-регулятора); $q(19) — q(24)$ — уравнения формирующего фильтра, моделирующего внешние воздействия. В модуле реализован расчет управляющих воздействий, формируемых в устройстве управления (используется в совокупности с уравнениями объекта управления).
main.m	Основной модуль программы. Предназначен для вызова модуля инициализации параметров модели системы управления parameters.m, задания параметров решателя дифференциальных уравнений и его вызова. По окончании расчета отображает графики переменных состояния, управляющих воздействий и пространственной траектории движения моделируемого судна (заданной и полученной в результате моделирования).

Для моделирования приняты следующие параметры экспериментального модельного судна [6]:

$$m = 257 \text{ кг}, x_G = 0 \text{ м}, I_z = 297,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$X_u = 6,95, Y_v = 49,5, Y_r = 7,00, N_r = 24,48;$$

$$X_u = 91,53, Y_v = 3,96, Y_r = 83,41, N_r = 89,52.$$

Для демонстрации работы программы предлагается следующий сценарий: судно перемещается в заданные моменты времени в точки, расположенные по углам квадрата с длиной стороны, равной 2 м. При этом также меняется пространственная ориентация корпуса. Моделирование выполнено на интервале 300 с.

Заданные траектории движения:

$$\eta_{\text{зад}} = \begin{cases} x_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0 \text{ м, если } t \leq 10 \text{ с} \\ \text{или} \\ 2 \text{ м, если } t \geq 140 \text{ с;} \end{cases} \\ y_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0 \text{ м, если } t \leq 60 \text{ с} \\ \text{или} \\ -2 \text{ м, если } t \geq 190 \text{ с;} \end{cases} \\ \psi_{\text{зад}}(t) = \begin{cases} 0, \text{ если } t \leq 120 \text{ с} \\ \text{или} \\ \pi / 4, \text{ если } t \geq 180 \text{ с.} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

На рис. 4 приведены графики переходных процессов по положению и скорости при изменении пространственных координат и ориентации морского судна по заданным траекториям.

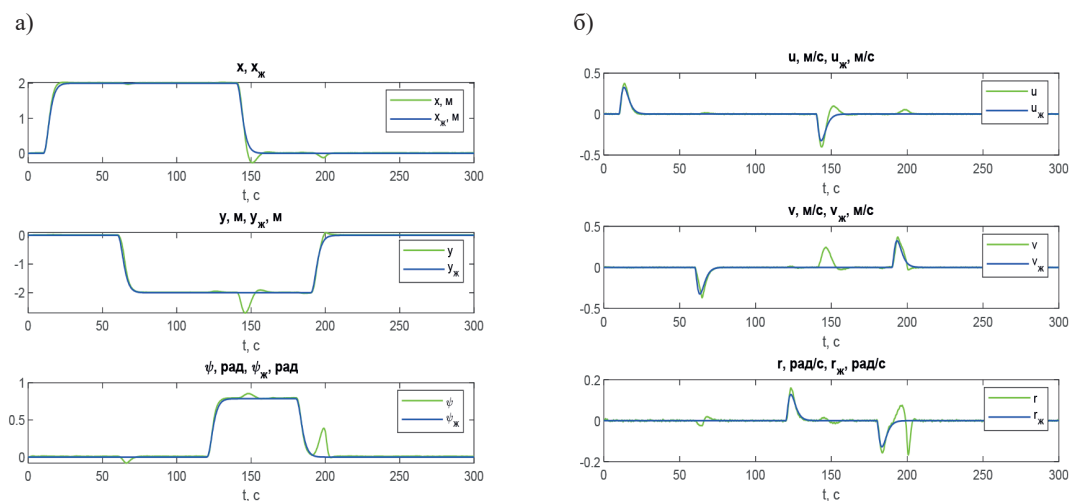


Рис. 4. Желаемые и измеренные положения (а) и скорости (б)

Для стабилизации в системе управления используется ПИД-регулятор в каждом отдельном канале управления. На рис. 5 приведены сигналы управления по каждому каналу. Итоговый результат пространственного движения приведен на рис. 6.

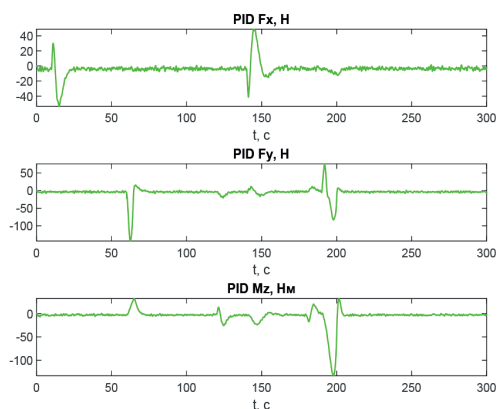


Рис. 5. Сигналы управления (ПИД-регулятор)

Итоговый результат пространственного движения приведен на рис. 6.

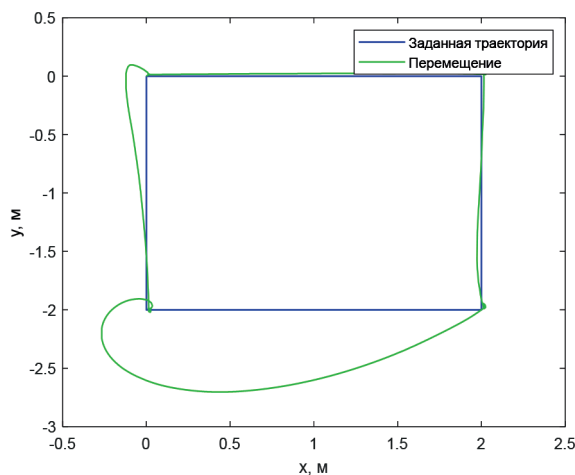


Рис. 6. Пространственные траектории движения

Предложенная программная реализация позволяет продемонстрировать применение модели в системе управления и позволит при соответствующем расширении функционала провести исследование альтернативных алгоритмов управления, построенных с использованием принципов адаптации или интеллектуальных технологий и методов машинного обучения.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрена система управления морским судном в режиме динамического позиционирования и описание ее основных элементов. Представлена модель плоскопараллельного движения судна, используемая в системе управления. Модель, представленная в векторно-матричной форме, является нелинейной в связи с отражением сложных гидродинамических взаимодействий корпуса и движительных устройств с внешней средой. Продолжением исследования является совершенствование или модернизация адаптивных методов управления, реализуемых совместно с методами параметрической идентификации моделей для использования их в задачах синтеза систем управления. Также в ходе дальнейшего исследования планируется решение задачи распределения управляющих воздействий, формируемых устройством управления движительных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархата А. В. Структура и принципы работы систем динамического позиционирования // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. — 2009. — Т. 12. — № 2. — С. 255–258. — EDN KPYRBR.
2. Никитин Е. Д. Анализ и структура систем динамического позиционирования судов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2017. — № 3(21). — С. 85–90. — EDN YPMWQO.
3. Оськин Д. А. Математические модели динамики судов, оснащенных винторулевыми колонками // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 3. — С. 124–132. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132. — EDN ZDREJJ.
4. Fossen T. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / T. Fossen — John Wiley & Sons Ltd, 2011 DOI: 10.1002/9781119994138.
5. Liu Z. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges / Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, C. Yuan // Annual Reviews in Control. — 2016. — Vol. 41. — Pp. 71–93. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
6. Alfheim H. L. Development of a dynamic positioning system for the revolt model ship / H. L. Alfheim, K. Muggerud, M. Breivik, E. F. Brekke, E. Eide, Ø. Engelhardtzen // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51. — Is. 29. — Pp. 116–121. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.479.

7. Øien S. I. T. Dynamic Positioning for Small Autonomouse Surface Vessels: MS diss / S. I. T. Øien. — NTNU, 2016. — 139 p.
8. Donnarumma S. Numerical models for ship dynamic positioning / S. Donnarumma, M. Martelli, S. Vignolo // MARINE VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. — CIMNE, 2015. — Pp. 1078–1088.
9. Таушева У. А. Математическая модель судна для отладки системы управления динамическим позиционированием судна средствами SIMINTECH // Системы управления и обработки информации. — 2018. — № 1(40). — С. 44–49. — EDN YUDZGO.
10. Калинин И. М. Компьютерная модель системы динамического позиционирования судна // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 4(394). — С. 109–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-109-120. — EDN YHEZCX.
11. Оськин Д. А. Информационно-управляющая система сбора и передачи информации для безэкипажного судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 2. — С. 24–31. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-24-31. — EDN MUSCNQ.

REFERENCES

1. Barakhta, A. V. and Yu. I. Yudin “Structure and principles of dynamic positioning systems’ work.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.2 (2009): 255–258.
2. Nikitin, E. D., T. V. Timochkina, V. A. Miklush and N. V. Yagotintseva “D. Analiz i struktura sistem dinamicheskogo pozitsionirovaniya sudov.” *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 3(21) (2017): 85–90.
3. Oskin, D. A., V. V. Bocharova and S. V. Osipov “Mathematical models of dynamics of vessels equipped with power propellers.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* 3 (2023): 124–132. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132.
4. Fossen, Thor I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Willy & Sons Ltd (2011). DOI: 10.1002/9781119994138.
5. Liu, Zhixiang, et al. “Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges.” *Annual Reviews in Control* 41 (2016): 71–93. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
6. Alfheim, Henrik Lemcke, et al. “Development of a dynamic positioning system for the revolt model ship.” *IFAC-PapersOnLine* 51.29 (2018): 116–121. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.479.
7. Øien, Stein-Inge Torset. Dynamic Positioning for Small Autonomouse Surface Vessels. MS diss. NTNU, 2016.
8. Donnarumma, S., M. Martelli and S. Vignolo. “Numerical Models for Ship Dynamic Positioning.” *MARINE VI: Proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. CIMNE, 2015: 1078–1088.
9. Tausheva, U. A. “Mathematical model of a vessel for debugging of vessel’s dynamic positioning control system by means of SIMINTECH facilities.” *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* 1(40) (2018): 44–49.
10. Kalinin, I. M., M. K. Ivanova, L. G. Pautov and A. V. Rudetskij “Computer model of the ship’s dynamic positioning system.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 4(394) (2020): 109–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-109-120.
11. Oskin, D. A., A. A. Gorshkov, S. A. Klimenko and N. A. Pogodin “Information and control system of collecting and transmitting data for unmanned vessel.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2 (2021): 24–31. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-24-31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мовчан Иван Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Оськин Дмитрий Александрович
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: movchan@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Movchan, Ivan M. — Postgraduate
Supervisor:
Oskin, Dmitry A.
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: movchan@msun.ru

Оськин Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: osykinda@msun.ru

Oskin, Dmitry A.
PhD, associate professor
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: osykinda@msun.ru

*Статья поступила в редакцию 04 декабря 2024 г.
Received: Dec. 04, 2024.*